

Philipp Brzezinsky

Thema: Reziprozitätskalibrierung von Kopfhörern

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich: Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik

Dresden, 2010

Erstprüfer: Herr Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Zweitprüfer: Herr Dr.-Ing. Andreas Wilde

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am: 30.11.2010

Bibliographische Beschreibung

Brzezinsky, Philipp

Untersuchung und Entwicklung eines Messsystems zur
Reziprozitätskalibrierung - von In-Ear-Kopfhörern.

-2010. – 71S. Dresden, Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich Mathematik /
Naturwissenschaften / Informatik, Diplomarbeit, 2010

Referat:

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, ein Messsystem zur Kalibrierung von Kopfhörern zu entwickeln. Das Messsystem soll möglichst einfach und kostengünstig aufgebaut werden. Daher soll die Soundkarte eines herkömmlichen Personal Computers zur Messdatenerfassung genutzt werden. Es werden im Weiteren Methoden untersucht, um Fehlerquellen, die eine Beeinflussung der Messergebnisse zur Folge haben, auszuschließen oder deren Einfluss zu mindern.

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich in der Durchführung dieser Diplomarbeit fachlich und persönlich unterstützt haben.

Die Bearbeitung meiner Diplomarbeit erfolgte am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) in Dresden. Mein besonderer Dank gilt dem Betreuer meiner Diplomarbeit, Herrn Andreas Wilde, der durch seinen Einsatz diese Arbeit erst möglich gemacht hat. Ebenso möchte ich mich bei der Hochschule Mittweida für das zur Verfügung stellen von notwendiger Messtechnik bedanken. Auch Herrn Detlef Schulz gilt mein Dank für seine Unterstützung bei Messungen an der Hochschule Mittweida.

Ferner danke ich meinen Eltern, die mir mein Studium erst ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis	IV
I. Abkürzungsverzeichnis.....	VI
II. Abbildungsverzeichnis.....	VII
1. Einleitung	1
2. Aufbau und Funktionsweise eines Ohrhörerpaars	3
2.1. Aufbau	3
2.2. Funktionsweise.....	4
3. Theoretische Betrachtungen.....	5
3.1. Reziprozitätskalibrierung	5
3.2. Akustische Transferimpedanz	9
3.3. Druckkammer	10
4. Aufbau und Funktionsweise Messsystem	12
4.1. Erarbeitung und Erläuterung des Messverfahrens.....	12
4.1.1. Erläuterung Messsystem.....	12
4.1.2. Aufbau des Messsystems	13
4.1.3. Dimensionierung der Druckkammer	16
4.1.4. Signalerzeugung	18
4.2. Kalibriervorgehen	20
4.3. Messvorgang.....	23
4.4. Signalverarbeitung	24
4.5. Fehlerbetrachtung	27
5. Auswertung Messungen	29
5.1. Koss "The Plug".....	29
5.2. Sony MDR E828 LP	32

5.3. Sony MDR E828 LP alt.....	34
5.4. Sony MDR EX35 LP	37
5.5. Vergleich der Kopfhörermodelle	39
6. Vergleichsmessungen	42
6.1. Vergleichsmessungen mit einem Kunstkopf	42
6.2. Vergleichsmessungen mit ½ Zoll-Mikrofon	45
6.2.1. Auswertung Vergleichsmessung Koss "The Plug"	47
6.2.2. Auswertung Vergleichsmessung Sony MDR E828	49
6.2.3. Auswertung Vergleichsmessung Sony MDR E828 alt	50
6.2.4. Auswertung Vergleichsmessung Sony MDR EX35	51
6.3. Vergleich der Übertragungsfunktionen linke/rechte Kopfhörerkapseln.....	52
7. Fehlersimulation	56
7.1. Betrachtung möglicher Fehlerquellen	56
7.2. Ergebnisse der Fehlersimulation	56
7.2.1. Fehlersimulation durch schlechte Abdichtung der Druckkammer und Verschluss der Ausgleichskanäle.....	57
7.2.2. Fehlersimulation zusätzlicher erzeugter Rauschsignale im Messsystem und Übersteuerung der Aufnahmekanäle.....	61
7.2.3. Fehlersimulation durch Eintragen von elektrischen und akustischen Störsignalen von außen in das Messsystem.....	64
7.2.4. Fehlersimulation durch Verwendung einer falsch dimensionierten Druckkammer	66
7.3. Auswertung	67
8. Interpretation und Schlussfolgerungen der Messungen	69
9. Ausblick.....	71
III. Literaturverzeichnis	IX

I. Abkürzungsverzeichnis

Kurzzeichen	Bedeutung
Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CMRR	common mode rejection ratio (Übersetzung: Gleichtaktunterdrückungsverhältnis)
d.h.	das heißt
KK	Kunstkopf
FB	Frequenzbereich
FFT	Fast Fourier transformation
HiFi	High Fidelity (Übersetzung: hohe Klangtreue)
Instamp	Instrumentenverstärker
ÜF	Übertragungsfunktion
z.B.	zum Beispiel

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau elektrodynamischer Schallwandler (Spule).....	3
Abbildung 2: Aufbau kapazitiver Schallwandler (Kondensator)	4
Abbildung 3: Prinzip der Reziprozitätskalibrierung	5
Abbildung 4: Darstellung Messprinzip	6
Abbildung 5: Impedanzverlauf.....	10
Abbildung 6: Darstellung Sinuswelle in der Druckkammer	11
Abbildung 7: Vereinfachtes Schaltbild der Messschaltung	12
Abbildung 8: Foto Messschaltung	15
Abbildung 9: Schaltplan Messschaltung.....	15
Abbildung 10: Messsystem mit Faradayschem Käfig	16
Abbildung 11: Druckkammer und Druckkammer mit Faradayschem Käfig.....	17
Abbildung 12: verwendeten Kopfhörer	17
Abbildung 13: Spektrum des Kalibriersignals	18
Abbildung 14: Kohärenz der Signale (elektrischer Übertragungsfall).....	22
Abbildung 15: Druckkammer mit Kopfhörer.....	23
Abbildung 16: rein elektrisch empfangener Störpegel	27
Abbildung 17: Übertragungsfunktion Koss "The Plug".....	30
Abbildung 18: Rückseite Koss "The Plug"	31
Abbildung 19: Übertragungsfunktion Sony MDR E828 LP	34
Abbildung 20: Übertragungsfunktion Sony MDR E828 LP alt.....	35
Abbildung 21: Vergleich der Übertragungsfunktion Sony E828/ Sony E828 alt	37
Abbildung 22: Kopfhörer Sony EX35 LP in 10mm Druckkammer	38
Abbildung 23: Übertragungsfunktion Sony MDR EX35 LP	39
Abbildung 24: Vergleich Übertragungsfunktionen	40
Abbildung 25: Verwendeter Kunstkopf	43
Abbildung 26: Modifizierter Kapselgehörschutz.....	44
Abbildung 27: Darstellung des Messaufbau der Mikrofonmessungen in einer Druckkammer	45
Abbildung 28: Vergleich der Koss" The Plug" Übertragungsfunktionen der verschiedenen Messsysteme	48

Abbildung 29:Vergleich der Sony MDR E828 Übertragungsfunktionen der verschiedenen Messsysteme	50
Abbildung 30:Vergleich der Sony MDR E828 alt Übertragungsfunktionen der verschiedenen Messsysteme	51
Abbildung 31:Vergleich der Sony MDR EX35 Übertragungsfunktionen der verschiedenen Messsysteme	52
Abbildung 32:Vergleich der Übertragungsfunktion Sony MDR E828 alt Hörerkapsel links und rechts	53
Abbildung 33: Vergleich der Übertragungsfunktion Koss "The Plug" Hörerkapsel links und rechts	54
Abbildung 34: Übertragungsfunktion einer Sendekanalseitig schlecht abgedichteten Druckkammer für den Kopfhörer Koss "The Plug"	57
Abbildung 35: Übertragungsfunktion einer beidseitig schlecht abgedichteten Druckkammer für den Kopfhörer Koss "The Plug"	58
Abbildung 36:Übertragungsfunktion einer empfangsseitig schlecht abgedichteten Druckkammer für den Kopfhörer Sony MDR E828.....	59
Abbildung 37: Übertragungsfunktion bei Verschluss der Ausgleichskanäle der Kopfhörerkapseln des Kopfhörer Koss "The Plug"	60
Abbildung 38: Übertragungsfunktion mit zusätzlichen erzeugten Rauschsignalen im Messsystem Kopfhörer Sony MDR E828	62
Abbildung 39: Übertragungsfunktion bei übersteuerten Aufnahmen der Messkanäle Kopfhörer Sony MDR E828.....	63
Abbildung 40: Übertragungsfunktion beeinflusst durch elektromagnetische Störsignale von außen Kopfhörer Koss "The Plug"	64
Abbildung 41:Übertragungsfunktion beeinflusst durch akustische Störsignale von außen Kopfhörer Sony MDR E828	65
Abbildung 42: Darstellung falsch und richtig dimensionierte Druckkammer für den Kopfhörer Sony MDR EX35	66
Abbildung 43: Übertragungsfunktion in einer ungünstig gewählten Druckkammer (Durchmesser 10mm) Kopfhörer Sony MDR EX35	67

1. Einleitung

1.1. Motivation und Zielstellung der Diplomarbeit

Die Ansprüche der Nutzer in Hinsicht auf die Klangqualität von mobilen Audiogeräten steigen in zunehmendem Maße mit der technischen Entwicklung dieser Multimediageräte. Diese Multimediageräte sind meist vom Hersteller mit einem Kopfhörer ausgestattet. Manchmal werden die mitgelieferten Kopfhörer jedoch den Anforderungen des Nutzers an Klangqualität oder Tragekomfort nicht gerecht. Daher entscheidet sich ein Nutzer oft dafür, andere Kopfhörer zu verwenden, die seinen Wünschen besser entsprechen. Diese werden im Allgemeinen einen anderen Übertragungsfaktor aufweisen als die des Herstellers. Da der Übertragungsfaktor ein Maß für den Wirkungsgrad der Kopfhörer ist, spielt dieser eine entscheidende Rolle für die am Ohr entstehenden Schalldruckpegel. Somit kann es bei der Nutzung von verschiedenen Kopfhörern, die eine unterschiedliche Übertragungsfunktion aufweisen, vor dem Trommelfell des Nutzers jeweils zu anderen Schalldruckpegeln kommen. Zusammen mit dem von Nutzer zu Nutzer unterschiedlich geformten Gehörgang sind somit recht große Schwankungen des Schalldruckpegels möglich. Allein schon durch die Nutzung unterschiedlicher Kopfhörer mit einem Abspielgerät sind Pegeldifferenzen von bis zu 15dB möglich. Dadurch sind selbst mittels eventueller Pegelbegrenzungen seitens der Abspielgeräte gehörschädigende Schalldrücke nicht auszuschließen. Mit Hilfe der Messung des Übertragungsfaktors eines Ohrhörerpaares kann auf das frequenzabhängige Verhalten dieser elektrodynamischen Schallwandler geschlossen werden. Damit könnte der Nutzer sein Abspielgerät auf die von ihm individuell bevorzugten Kopfhörer einstellen und eine mögliche Überschreitung der gehörschädigenden Schalldruckpegel verhindern.

Um dem Nutzer den Zugang zur personenbezogenen Kalibrierung zu ermöglichen und somit die oben genannten akustischen Effekte zu vermeiden, soll in dieser Diplomarbeit die Möglichkeit einer einfachen Messeinrichtung zur

Bestimmung des akustischen Übertragungsfaktors erarbeitet und überprüft werden. Die Messung soll unter Nutzung einer einfachen Soundkarte eines Personal Computers realisiert werden. Da es bei Kalibrierungen oft schon durch kleine Fehler in der Bedienung und im Aufbau der Kalibriermessung zu ungenauen Ergebnissen kommen kann, sollen mögliche Fehlerquellen bei der Kalibration abgeschätzt werden und Strategien zur Vermeidung von Fehlkalibrationen anhand der Ergebnisse aus der Fehlerquellenanalyse entworfen und getestet werden.

2. Aufbau und Funktionsweise eines Ohrhörerpaars

2.1. Aufbau

In der heutigen Zeit steht dem Nutzer tragbarer Multimediageräte im Alltagsgebrauch eine sehr große Bandbreite solcher vielseitig nutzbarer Abspielgeräte zur Auswahl. Den größten Anteil dieses Bereiches nehmen MP3-Player sowie Mobilfunktelefone ein. Viele dieser Geräte besitzen die Möglichkeit, beim Abspielen von Musikstücken oder Filmen die im Apparat integrierten Lautsprecher zu nutzen. Trotz des meist recht guten Klangbildes, das diese Lautsprecher erzeugen können, wird bedingt durch die Geräuschsituation am Ort der Nutzung oft auf Ohrhörer zurückgegriffen. Da diese Ohrhörer durch ihre große Verbreitung möglichst günstig bei dennoch hoher Audioqualität produziert werden sollen, muss deren zugrundeliegendes Wirkungsprinzip diesen Anforderungen gerecht werden. Deshalb nutzt man bei sehr vielen dieser Kopfhörer das elektrodynamische und das elektrostatische Schallwandlerprinzip. Für beide Wandlerprinzipien gibt es zwei gebräuchliche Bauarten: das elektrodynamische Prinzip nutzt zur Erzeugung eines Schallwechseldruckes die Umwandlung eines Spannungssignales unter Verwendung einer Spule in einem Magnetfeld (Abbildung 1); ein elektrostatischer Wandler generiert mittels kapazitiver Effekte aus dem Spannungssignal einen Schallwechseldruck (Abbildung 2).

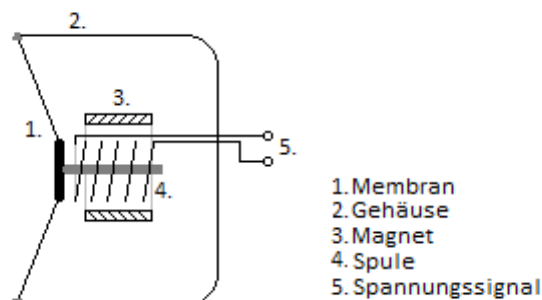


Abbildung 1: Aufbau elektrodynamischer Schallwandler (Spule)

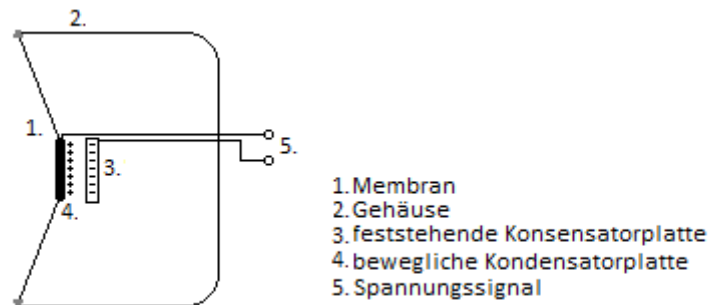


Abbildung 2: Aufbau kapazitiver Schallwandler (Kondensator)

2.2. Funktionsweise

Für diese Diplomarbeit wurden nur Kopfhörer verwendet, die mittels elektrodynamischer Effekte ein Schallsignal erzeugen. Deshalb soll im Weiteren nur auf diese spezielle Bauart und deren Funktionsweise eingegangen werden. Dieses Prinzip basiert auf der elektromagnetischen Umsetzung, bei der sich eine stromdurchflossene Spule oder ein stromführender Leiter im Magnetfeld eines feststehenden Permanentmagneten befindet. Die Spule ist mechanisch an die schwingfähige Membran des Ohrhörers gekoppelt und überträgt somit bei Anlegen eines Wechselspannungssignals eine dem Spannungssignal entsprechende, mechanische Kraft auf die Hörermembran. Diese Schwingung bzw. die Membranschnelle wird in einem Medium in eine Schalldruckwelle transformiert.

3. Theoretische Betrachtungen

3.1. Reziprozitätskalibrierung

Das Reziprozitätskalibrierungsverfahren [3] ist eine sehr genaue und zuverlässige Methode zum Kalibrieren elektroakustischer Wandler. Es macht sich das Prinzip der Umkehrbarkeit von elektroakustischen/-akustoelektrischen Wandlern zunutze, wobei die Reziprozitätsbeziehungen für einen elektroakustischen Vierpol (Formel 3.1) zugrunde gelegt werden.

$$\left(\frac{U}{p}\right)_{I=0} = - \left(\frac{Q}{I}\right)_{p=0} [3] \quad (3.1)$$

Dabei ist U die Leerlaufspannung des Mikrofons, I der Sendestrom des Sendelautsprechers, Q die Volumenschnelle der Teilchen des schallübertragenden Mediums und p der Schalldruck, der am Ort des Mikrofons herrscht.

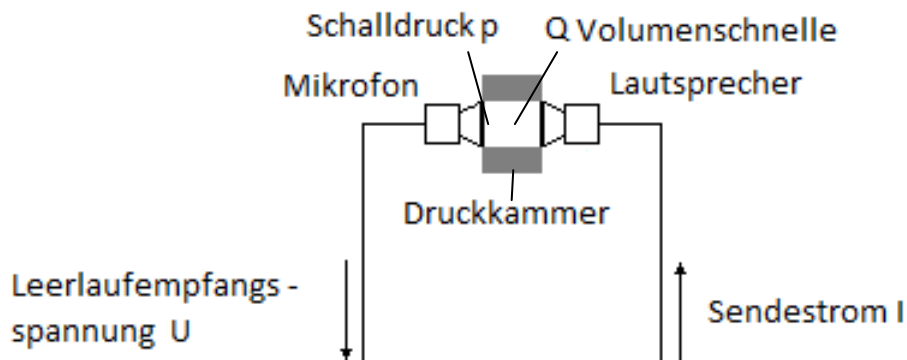


Abbildung 3: Prinzip der Reziprozitätskalibrierung

Durch die Umkehrbarkeit eines Schallwandlers kann ein Mikrofon als Lautsprecher betrieben werden und umgekehrt ein Lautsprecher als ein Mikrofon genutzt werden.

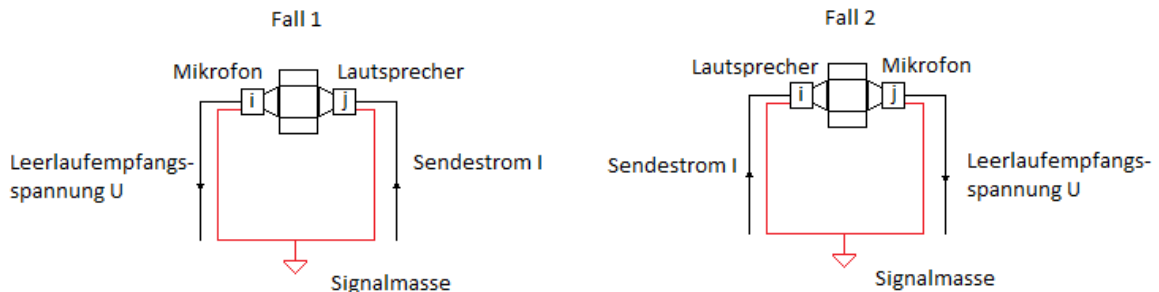


Abbildung 4: Darstellung Messprinzip

Dieser Effekt der Wandelbarkeit eines Lautsprechers hin zu einem Mikrofon und umgekehrt wird in der Messung des Übertragungsfaktors eines Kopfhörers genutzt. So ist es möglich, über eine geeignete elektrische Schaltung einen Hörer des Kopfhörers als Mikrofon zu betreiben und den anderen Hörer als Lautsprecher zu nutzen. Dabei ist zu beachten, dass sich diese Schaltung nur mit Stereo-Kopfhörern realisieren lässt, da es je eines eigenen Kanals für den Lautsprecher bzw. das Mikrofon bedarf. Durch diese Schaltung kann ein vom Lautsprecher erzeugtes akustisches Signal mit dem als Mikrofon genutzten Ohrhörer aufgezeichnet werden. Um den Übertragungsfaktor des Kopfhörers nun errechnen zu können, bedarf es nur der Leerlaufempfangsspannung des Mikrofons, des Sendestromes des Lautsprechers sowie der akustischen Eigenschaften des schallübertragenden Mediums. Jedoch sind die Bedingungen, unter denen das akustische Signal gesendet und aufgezeichnet werden, von entscheidender Bedeutung für die Handhabbarkeit der gemessenen Signale. So wäre die Übertragung des Schallsignals unter Freifeld oder Diffusfeld-Bedingungen sehr einfach zu berechnen, geringe Übertragungspegel und ungünstige Signal-Rauschverhältnisse würden jedoch größere Probleme bei der Signalverarbeitung verursachen. Eine einfachere Verarbeitung der gemessenen Signale wäre durch eine Druckkammer-Reziprozitätskalibrierung möglich. Hier wird das Schallsignal in einer kleinen Druckkammer von dem Lautsprecher auf das Mikrofon übertragen. So können

deutlich höhere Schallpegel am Mikrofon erreicht werden. Auch hat diese Methode den Vorteil, dass durch die Abschirmung der Druckkammer die beiden Schallwandler durch geringere Störpegel beeinflusst werden und so ein besseres Signal-Rauschverhältnis erzeugen wird.

Dabei ist egal, welcher der beiden Kopfhörer das Mikrofon bzw. den Sender darstellt, beide können vertauscht werden. In Abbildung 4 stellt Fall 1 dabei den Sendefall des Ohrhörers i (links) und den Empfangsfall des Ohrhörers j (rechts) dar. Der Instrumentenverstärker 1 (Instamp 1) misst in diesem Fall den zur Berechnung der elektrischen Transferimpedanz Z_{ij} nötigen Sendestrom I_i . Der zweite Instrumentenverstärker (Instamp 2) ermittelt die ebenfalls nötige Leerlaufempfangsspannung U_j des rechten Hörers. Fall 2 in Abbildung 3 zeigt den Tausch des Sende-/Empfangsfalls zwischen den beiden Ohrhörern, wobei die beiden Verstärker jeweils dieselben Größen wie in Fall 1 ermitteln. Für die Messungen wird über den Line-Out-Kanal der verwendeten Soundkarte ein Kalibriersignal auf den Sendeohrhörer geleitet. Die Druckkammer bildet die akustische Strecke, über die das akustische Signal an den Empfangskopfhörer übertragen wird. Über den Line-In Kanal der Soundkarte wird das vom Instrumentenverstärker 1 und 2 verstärkte Messsignal an den Rechner geleitet, auf diesem aufgezeichnet, verarbeitet und ausgewertet.

Durch Gleichung 3.2 wird Q im Sende- und Empfangsfall mit dem Übertragungsfaktor M verknüpft. Der Übertragungsfaktor des als Mikrofon betriebenen Ohrhörers ergibt sich wie folgt:

$$M = \frac{U_{I=0}}{p} = - \frac{Q_{p=0}}{I} \quad [3] \quad (3.2)$$

Die elektrische Transferimpedanz Z_{ij} ist eine weitere Grundgröße des aus zwei elektroakustischen Wandlern und einer akustischen Strecke bestehenden Messsystems. Z_{ij} ergibt sich definitionsgemäß:

$$Z_{ij} = \frac{U_j}{I_i} \quad \text{bzw.} \quad Z_{ji} = \frac{U_i}{I_j} \quad [3] \quad (3.3)$$

Je nach Betriebsrichtung der einzelnen Ohrhörer des Kopfhörerpaares ist U_j bzw. U_i dabei die Leerlaufempfangsspannung des als Mikrofon betriebenen Ohrhörers. I_i bzw. I_j ist jeweils der Sendestrom des als Lautsprecher genutzten Hörers. Durch die Übertragungsfaktoren der elektroakustischen Wandler M_i und M_j lässt sich Z_{ij} mit Hilfe der akustischen Transferimpedanz Z_{ak} der akustischen Übertragungsstrecke ausdrücken.

$$Z_{ij} = \frac{U_j}{I_i} = M_i \cdot Z_{ak} \cdot M_j = Z_{ji} \quad [3] \quad (3.4)$$

Mit einer Messung der elektrischen Transferimpedanz kann somit, bei Kenntnis der akustischen Transferimpedanz, das Produkt der beiden unbekannten Übertragungsfaktoren bestimmt werden. Unter der notwendigen Annahme, dass M_i gleich M_j ist, kommt man durch Umstellen von Gleichung (3.4) zu dem gesuchten Übertragungsfaktor.

$$M = M_i = M_j$$

$$Z_{ij} = \frac{U_j}{I_i} = M^2 \cdot Z_{ak} = Z_{ji}$$

$$M = \sqrt{\frac{Z_{ij}}{Z_{ak}}} \quad (3.5)$$

Mit Hilfe der akustischen Transferimpedanz Z_{ak} kann nun der Übertragungsfaktor des Ohrhörerpaares bestimmt werden. Die Einheit der Übertragungsfunktion ist V/Pa bzw. mV/Pa.

3.2. Akustische Transferimpedanz

Um das Kalibriersystem vollständig erfassen zu können, wird noch die akustische Transferimpedanz [3] benötigt. Diese beschreibt die akustischen Widerstandseigenschaften des Luftvolumens in der Druckkammer, welche die beiden Ohrhörer akustisch koppelt.

$$Z_{ak} = \frac{\kappa P_0}{j\omega V_0} \quad (3.6)$$

P_0 ist der Normaldruck von 101325Pa, der in und um die Druckkammer herrscht. κ ist der temperaturabhängige Isentropenexponent, der zur Berechnung von Z_{ak} auf einen Wert von 1,40 (für trockene, 20°C warme Luft) festgelegt wird. V_0 ist das durch die Ohrhörer in der Druckkammer eingeschlossene Luftvolumen. Durch den Faktor ω wird das frequenzabhängige Verhalten der Impedanz beschrieben. Bedingung für die Anwendbarkeit dieser Formel ist, dass die Wellenlängen der erzeugten Frequenzen groß gegenüber der Länge der Druckkammer ist.

Wie aus der Formel 3.6 ersichtlich ist, sinkt mit steigender Frequenz des Kalibriersignals die akustische Impedanz des in der Druckkammer eingeschlossenen Luftvolumens (Abb. 5).

Abbildung 5 zeigt den Impedanzverlauf für eine Druckkammer des Volumens von ca. 1,13cm³.

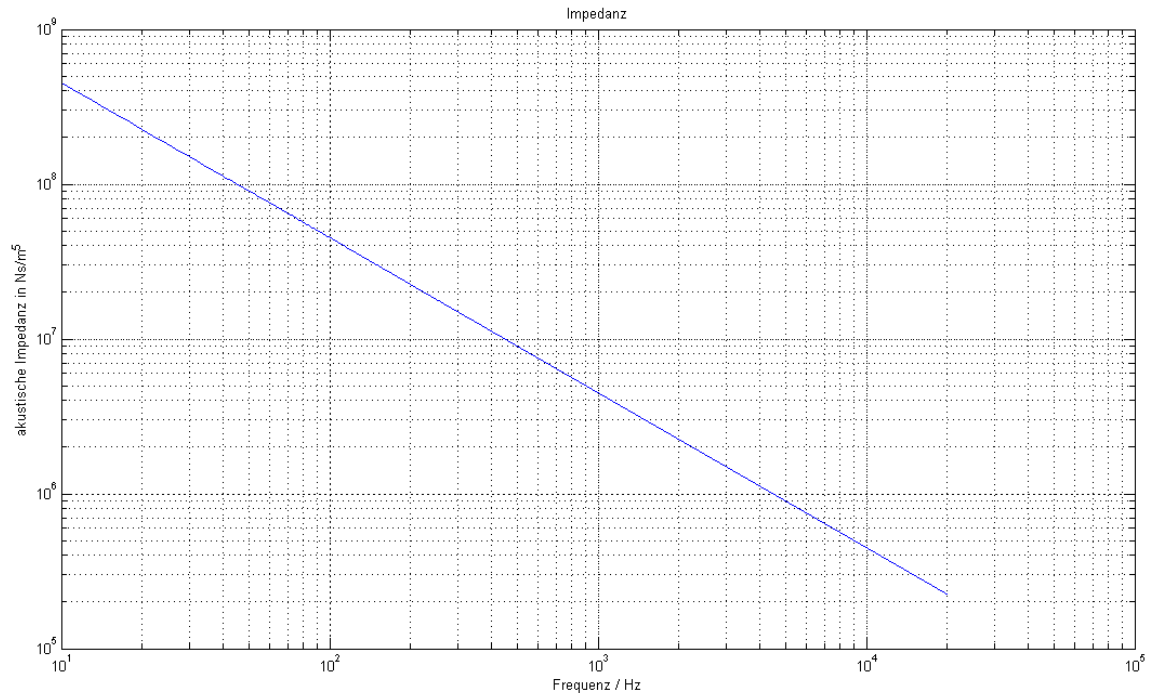


Abbildung 5: Impedanzverlauf

3.3. Druckkammer

Um ein möglichst genaues und einfaches Messverfahren zu verwenden, wird der Übertragungsfaktor über die akustische Übertragungsstrecke einer Druckkammer gemessen. Dabei sei die Größe der Druckkammer klein gegenüber der Wellenlänge des Kalibriersignals zu wählen. In diesem Fall verhält sich das Kammervolumen V_0 innerhalb der Druckkammer akustisch wie eine Feder. Der Schalldruck ist somit innerhalb des Volumens V_0 nahezu konstant. Es bilden sich keine stehenden Wellen in diesem Volumen aus. Das zur Messung verwendete Signal reicht bis zu einer Frequenz von 16kHz. Die Druckkammer sollte somit eine Länge von 1cm auf keinen Fall überschreiten, um so den Effekt von stehenden Wellen in höheren Frequenzbereichen zu vermeiden.

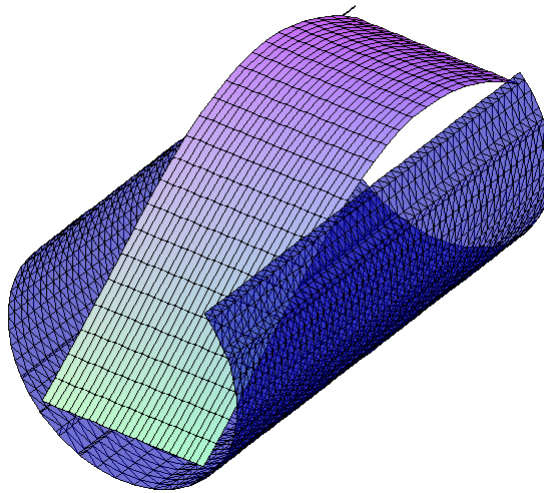


Abbildung 6: Darstellung Sinuswelle in der Druckkammer

Abbildung 6 zeigt beispielhaft die kürzeste Wellenlänge die sich in der Druckkammer für eine möglichst genaue Kalibriermessung ausbilden sollte. Es sollte sich maximal nur eine halbe Sinusschwingung ausbilden können.

4. Aufbau und Funktionsweise Messsystem

4.1. Erarbeitung und Erläuterung des Messverfahrens

4.1.1. Erläuterung Messsystem

Das in dieser Diplomarbeit erarbeitete Messsystem arbeitet nach dem Prinzip der Druckkammer-Reziprozitätskalibrierung. Alle relevanten Messgrößen sollen dabei mittels einer Soundkarte eines Personal Computers aufgezeichnet werden. Wie bereits oben beschrieben, müssen für die Reziprozitätskalibrierung die jeweiligen frequenzabhängigen Sendeströme des als Sender betriebenen und die frequenzabhängigen Empfangsspannungen des als Mikrofon genutzten Ohrhörers gemessen werden. Die entstehenden Leerlaufspannungen sowie die Sendespannung sind jedoch nur sehr klein und müssen zur besseren Erfassbarkeit und Verarbeitung verstärkt werden.

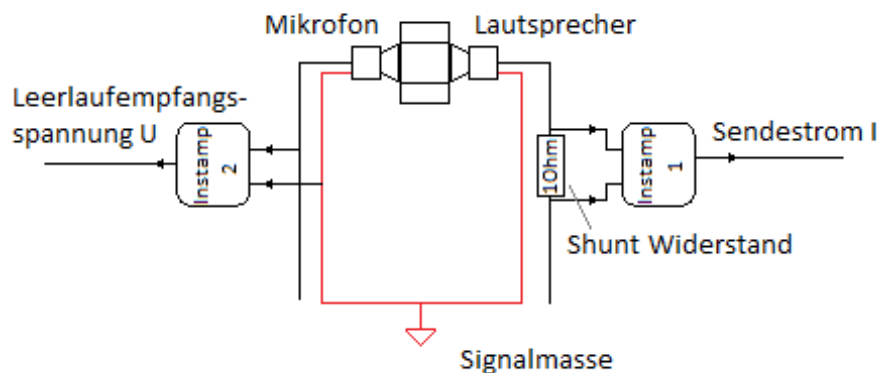


Abbildung 7: Vereinfachtes Schaltbild der Messschaltung

Zur Verstärkung der gemessenen Spannungen auf dem Sende- und Empfangskanal wird je ein Instrumentenverstärker (LT1167) der Firma LinearTechnologie [5] verwendet. Diese zeichnen sich besonders durch ihr hohes Gleichtaktunterdrückungsverhältnis (CMRR) sowie ihre geringe Eingangs-Offset-Spannung aus. Die Gleichtaktunterdrückung [16] ist ein Maß dafür, wie sehr sich die Ausgangsspannung eines Differenzverstärkers ändert, wenn sich die beiden Eingangsspannungen um einen gleichen Betrag ändern.

Im idealen Fall ändert sich die Ausgangsspannung, bei einer Änderung der beiden Eingangsspannungen um denselben Betrag, nicht. Die Eingangs-Offset-Spannung ist ein Nullpunktfehler, den ein Instrumentenverstärker auf die gemessene Eingangsspannung durch systematische Fehler in der Schaltung aufschlägt. Beide Effekte würden bei zu großer Ausprägung eine übermäßige Verfälschung der Messergebnisse zur Folge haben.

Um bestmögliche Messergebnisse zu erreichen, sollte auch das Kalibriersignal gewissen Anforderungen entsprechen.

Deshalb wird als Kalibriersignal ein Multisinus mit einem möglichst geringen Crest-Faktor verwendet. Der Crest-Faktor, auch Scheitelfaktor genannt, bezeichnet das Verhältnis von größtem Betrag des Momentanwertes eines Wechselsignals zum Effektivwert dieses Wechselsignals. Ein geringer Scheitelfaktor bedeutet, dass Effektivwert und Scheitelwert eines Signals möglichst gleich groß sind. Um die geforderten Eigenschaften des Kalibriersignals zu erreichen, wird es mit dem Programm MATLAB[®] selbst erzeugt und als Wave-Datei abgespeichert. Die Eigenschaften und die Erzeugung des Signals werden in Kapitel 4.1.4 genauer beschrieben.

4.1.2. Aufbau des Messsystems

Über den Line-Out-Kanal der Soundkarte kann das erzeugte Multisinussignal mittels Klinkenkabel auf die Leiterplatte der Messschaltung geleitet und über einen 1 Ohm Shunt-Widerstand über eine 3,5mm Klinkenbuchse auf den als Sender genutzten Kopfhörer übermittelt werden. Der Shunt-Widerstand ist ein elektrischer Widerstand, der zur Messung der über ihn abfallenden Spannung benötigt wird. Über diesen zum Widerstand proportionalen Spannungsabfall kann auf den elektrischen Strom, der auf dem Sendekanal fließt, mittels Ohmschen Gesetzes rückgerechnet werden. Der in Abb. 9 als Instamp 1 bezeichnete Verstärker erfasst dazu die Spannung über dem Shunt und gibt die Differenz dieser Spannungsmessungen verstärkt aus. Die benötigte Verstärkung kann mit Hilfe des Präzisions-Trimpotentiometer (R_{Gain}) eingestellt werden. Die Verstärkung [5] des Instrumentenverstärkers errechnet sich dabei wie folgt:

$$G = (49.4 \text{ k}\Omega / R_{\text{Gain}}) + 1 \quad (4.1)$$

Das Ausgangssignal des ersten Instrumentenverstärkers wird auf einen Kanal eines Stereo-Klinkenkabels eingespeist und über dieses Kabel an den Line-In-Anschluss der PC-Soundkarte gesendet. Mittels des Open Source Programms AUDACITY® 1.3 Beta wird dieses Signal aufgezeichnet und als Wave-Datei gespeichert. Da dieses Dateiformat nicht komprimiert ist, enthält die Datei alle Rohdaten, die zur weiteren Berechnung des Übertragungsfaktors benötigt werden. Durch die getrennte Verlotung der beiden Kanäle der ersten Klinkenbuchse wird das Kalibriersignal nur auf einen der beiden Ohrhörer geleitet. Buchse 2 ist so verdrahtet, dass der Sende- bzw. Empfangskanal der Kopfhörer vertauscht werden kann. Der Kanal der Buchsen, der nicht für die Weiterleitung des Sendesignals genutzt wird, leitet das Mikrofonsignal an die Messkanäle des zweiten Instrumentenverstärkers. Es wird je nur eine der beiden Klinkenbuchsen für eine Messung genutzt.

Das Schallsignal des Sendehörers trifft bei einer Messung in der Druckkammer auf die Membran des als Mikrofon betriebenen Hörers und versetzt diese in frequenzabhängige Schwingungen. Durch die mechanische Ankopplung der Kopfhörerspule an diese schwingende Membran induziert diese im Magnetfeld des Permanentmagnets eine Spannung, welche als Leerlaufspannung bezeichnet wird. Das induzierte Spannungssignal wird auf einen Messeingang des zweiten Verstärkers geführt. An dem zweiten Messeingang liegt das Spannungssignal des Bezugspotenzials der Kopfhörer an. Über eine Schaltung von zwei 9Volt-Blockbatterien wird eine symmetrische Spannungsversorgung erzeugt. Symmetrische Spannung bedeutet, dass die positive und negative Spannung jeweils gleich groß sind. Für die hier aufgebaute Schaltung heißt dies, dass an den Anschlüssen 7 (Abbildung 9) der Instrumentenverstärker jeweils etwa +9V und an den Anschlüssen 4 jeweils etwa -9V anliegen. Diese spezielle Spannungsversorgung wird benötigt, um die Instrumentenverstärker betreiben zu können. Auch wird durch die Schaltung der Blockbatterien die als Referenzspannung erforderliche virtuelle Masse generiert.

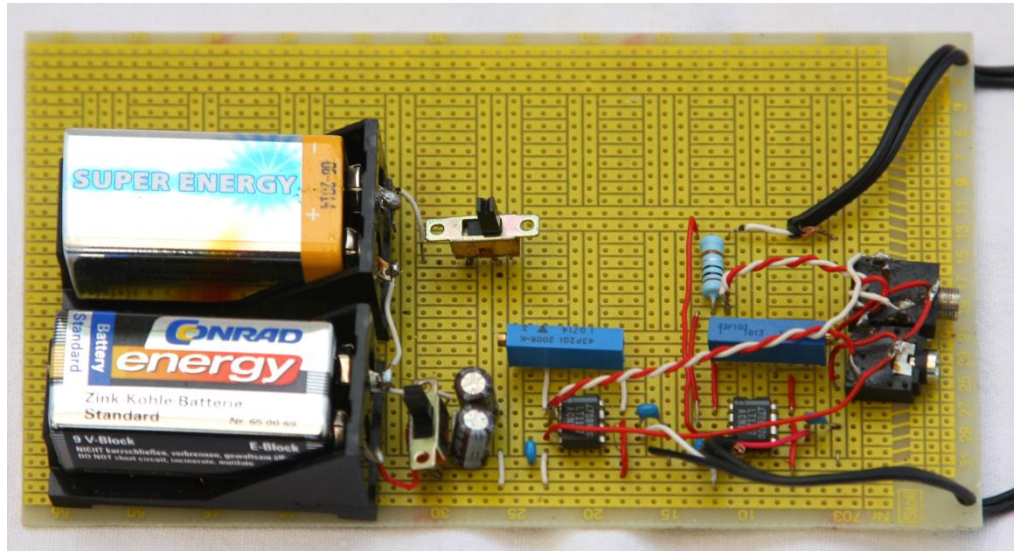


Abbildung 8: Foto Messschaltung

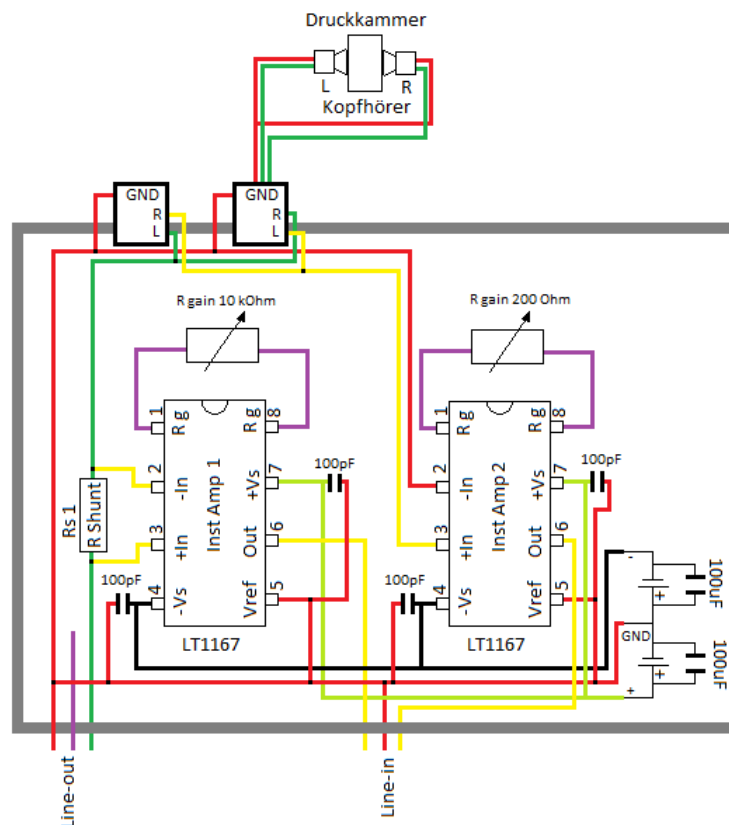


Abbildung 9: Schaltplan Messschaltung

Da bei mehreren Vorversuchen ein starkes Rauschen und manchmal Störsignale mit der Schaltung empfangen wurden, ist diese durch einen

Faradayschen Käfig gegen elektromagnetische Signale aus der Umgebung abgeschirmt.

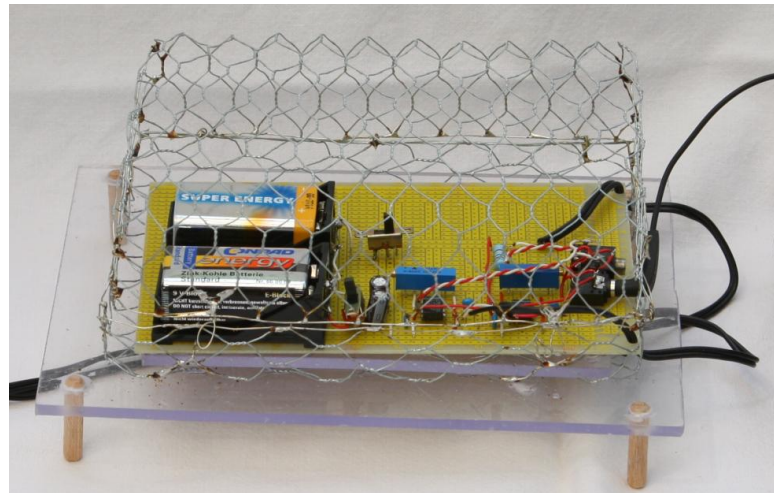


Abbildung 10: Messsystem mit Faradayschem Käfig

4.1.3. Dimensionierung der Druckkammer

Die Grundplatte der Druckkammer hat mehrere Bohrungen, um einen bestmöglichen Sitz und eine bessere Ausbreitung des Schalls im Inneren der Kammern für Kopfhörer unterschiedlichen Durchmessers (Abb. 12) sicher zu stellen. Die Ränder der Bohrungen sind für eine bessere Abdichtung der Druckkammervolumina gegen die Umgebung mit Silikon umrandet. Die Grundplatte besteht aus einem harten Kunststoff, so dass nur ein sehr geringer Schallanteil an den Kammerinnenwänden absorbiert wird. Durch die verschiedenen Durchmesser der Druckkammern muss bei der Berechnung der akustischen Impedanzen darauf geachtet werden, dass das richtige Kammervolumen verwendet wird.



Abbildung 11: Druckkammer und Druckkammer mit Faradayschem Käfig

Da auch die Kopfhörerkabel sehr anfällig auf Störsignale aus der Umgebung reagiert und es somit zu Verfälschungen der Messergebnisse kommen kann, ist auch die Druckkammer von einem Faradayschen Käfig umgeben.



Abbildung 12: verwendete Kopfhörer

Soweit es möglich war, wurden Bezüge und Ohrstopfen der Ohrhörer für die Messungen entfernt, da durch diese mögliche Undichtheiten entstehen könnten und somit die Messungen des Übertragungsfaktors beeinflussen würden.

4.1.4. Signalerzeugung

Um eine Vergleichsmöglichkeit zu früheren Messergebnissen von Herrn Dr. Wilde zu haben, soll das Signal, welches zur Bestimmung des Übertragungsfaktors genutzt wird, ein Multisinussignal sein. Bei diesem Multisinus soll das Spektrum von 0-16kHz alle 32Hz einen konstanten Pegel aufweisen und zwischen diesen Frequenzen Null sein. Um ein Signal mit solchen Eigenschaften zu erzeugen, wird im Programm MATLAB® ein Spektrum mit Spektrallinien konstanter Amplitude erzeugt. Dieses generierte Spektrum wird in den Zeitbereich transformiert und in den reellen Wertebereich überführt (siehe Quelltext1).

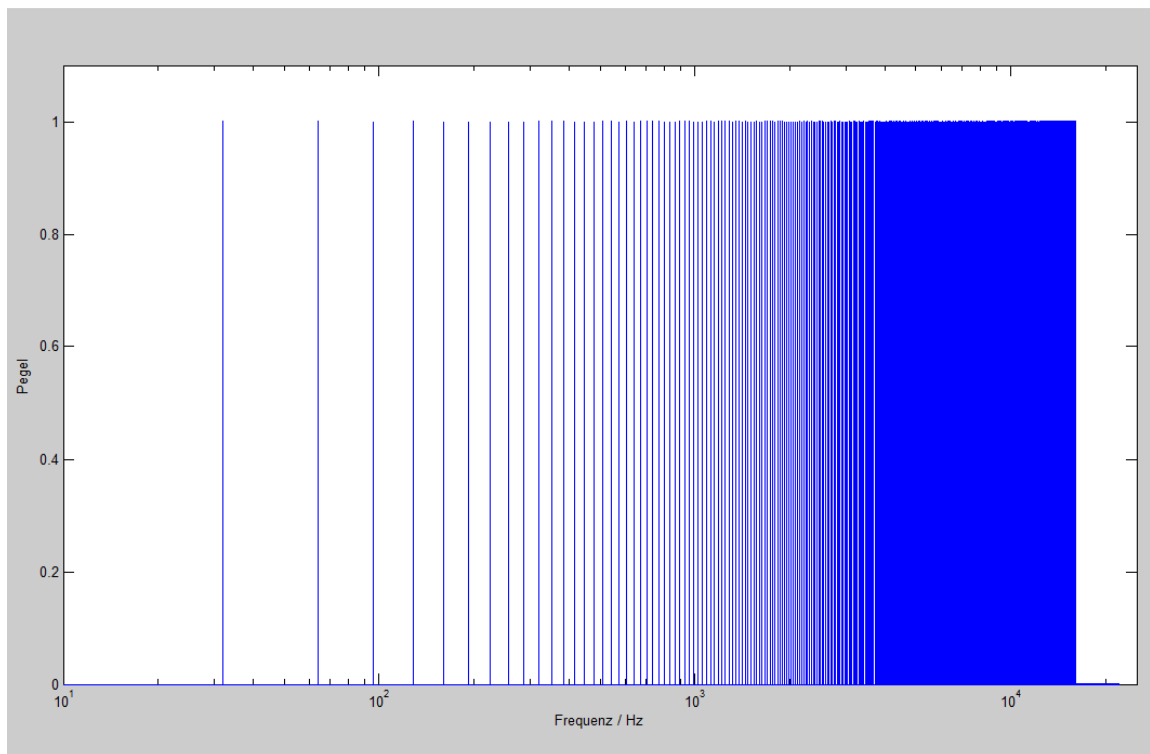


Abbildung 13: Spektrum des Kalibriersignals

Da die verwendete Soundkarte eine Abtastfrequenz von 44100Hz besitzt, kann laut des Whittaker-Kotelnikow-Shannon-Abtasttheorems maximal eine Frequenz von 22049Hz abgetastet werden. Um in diesem zur Verfügung stehenden Frequenzbereich von ca. 22kHz ein Spektrum mit einem Intervall von 32Hz zu generieren, bräuchte es 689 Spektrallinien. Bedingt durch die Druckkammergröße ist es nur bis etwa 16kHz möglich, eine Übertragung des Schallsignals ohne stehende Wellen in der Druckkammer zu garantieren.

Da eine Erzeugung und Sendung der Frequenzen oberhalb von 16kHz nicht sinnvoll wäre, können alle Spektrallinien oberhalb dieser Frequenz auf null gesetzt werden (Abb. 13).

Das so erzeugte Frequenzspektrum wird durch eine inverse Fourier-Transformation in ein Zeitsignal transformiert, welches 1000-mal aneinander gereiht wird. Das wiederholte Zeitsignal wird als Wave-Datei gespeichert und kann mit einem herkömmlichen Mediaplayer von jedem Computer wiedergegeben werden. Zur Auswertung der in einer Messung aufgenommenen Daten wird für jede der 1000 Wiederholungen im Zeitsignal einzeln ein Spektrum in den Frequenzbereich transformiert, über welche dann gemittelt wird. Da über ein im Zeitbereich echt periodisches Spektrum gemittelt wird, kann in der Signalverarbeitung auf die Anwendung einer Fensterfunktion zur spektralen Korrektur verzichtet werden. Außerdem hat die Mittelung über die hier erzeugten 1000 einzelnen Spektren den Vorteil, dass Rauscheffekte in der Auswertung unterdrückt werden.

Quelltext 1

(Generierung Kalibriersignal)

```
n=689;           % Anzahl der Linien im Spektrum
phase=rand(n,1)*2*pi;
sp=cos(phase)+i*sin(phase);
sp(500:689)=0.;
spf=[0+i*0;sp(1:1:n);conj(sp(n:-1:1))];
sig=ifft(spf);
N=1000;
```

```
S=(1:1N*length(sig));  
for i=1:N  
    S((i-1)*length(sig)+1:i*length(sig))= real(sig);  
end;  
fn = 'c:\MATLAB7\work\Signal.wav';  
wavwrite(S,fa,32,fn);
```

4.2. Kalibriervorgehen

Um möglichst genaue Messergebnisse ermitteln zu können und dadurch den Übertragungsfaktor der Kopfhörer bestmöglich zu errechnen, ist eine Kalibrierung des Messsystems notwendig. Bei Vorversuchen zur Messung sind elektrische Übertragungseffekte aufgetreten, die der verwendeten Soundkarte zugeschrieben werden können. Dieser elektrisch übertragene Signalanteil muss unbedingt für die tatsächliche Ermittlung des übertragenen Signals beachtet werden.

Der elektrisch übertragene Signalanteil zeigt sich, wenn eine akustische Übertragung des Signals von Sendekopfhörer auf den Empfangskopfhörer unterbunden wird. In diesem Fall ist im Spektrum des empfangenen Signals ein Anteil des gesendeten Signals erkennbar. Dieser Signalanteil kann nur durch eine Überleitung des Signals auf elektrischem Wege in der Soundkarte auf beide Messkanäle erklärt werden.

Zur genauen Kalibrierung werden, neben den elektrisch übertragenen Signalen in der Soundkarte, auch weitere Fehler wie Störpegel, die durch Eigenschwingungen im Messsystem, ungewollte Verschiebungen, Dämpfungen, Rauschen, Verstärkungen und Überlagerungen entstehen, mit Hilfe des Programmes AUDACITY® aufgezeichnet. Die möglichen vom Messsystem und den Kopfhörern verursachten Fehler können am besten im Falle der nicht-akustischen Übertragung von Sende- zu Empfangskopfhörer bestimmt werden. Dazu wird durch geeignete Maßnahmen zwischen sendendem und empfangendem Kopfhörer eine akustische Übermittlung des

Sendesignals ausgeschlossen. Das Kalibriersignal wird auf den Sendekopfhörer geleitet und das am Aufnahmekanal ankommende Signal aufgezeichnet.

Über die Bestimmung der Kohärenzfunktion [9], einem Maß für den Grad der linearen Abhängigkeit zweier Signale, lässt sich die Ähnlichkeit zwischen dem Frequenzspektrum des gesendeten Kalibriersignals und dem aufgezeichneten Empfangssignal ermitteln. Dadurch kann das Übertragungsverhalten im elektrischen Sendefall eingeschätzt und das statistische Verhalten der beiden Signale bestimmt werden. Die Formel zur Berechnung der Kohärenzfunktion lautet [9]:

$$\gamma^2_{XY}(f) = \frac{|\{G_{AB}(f)\}|^2}{\{G_{AA}(f)\} \cdot \{G_{BB}(f)\}} \quad (4.2)$$

Dabei ist $\{G_{AB}(f)\}$ das gemittelte Kreuzleistungsdichtespektrum, welches die Multiplikation des konjugiert-komplexen Empfangsspektrums mit dem Sendespektrum darstellt. $\{G_{AA}(f)\}$ und $\{G_{BB}(f)\}$ sind die Autoleistungsspektren des Sende- bzw. Empfangssignals. Die Autoleistungsspektren sind rein reell und die in ihnen gleichermaßen enthaltenen Rausch- und Nutzsignalanteile werden, bei jeder Wiederholung im Spektrum aufaddiert. Das Kreuzleistungsdichtespektrum hingegen ist komplex. Rauschanteile werden, durch ihre zufällige Phase über die mehrfache Wiederholung somit allmählich herausgemittelt. Die Kohärenz nimmt nur Werte zwischen Null und Eins an. Besteht vollständige lineare Abhängigkeit zwischen beiden verglichenen Signalen, ergibt sich der Wert für die Kohärenz zu Eins. Im Gegenbeispiel ist bei vollständig nichtlinearem Zusammenhang zwischen den Signalen der Wert der Kohärenz durch statistische Ähnlichkeiten der Signale nahe Null.

Im besten Fall wäre die errechnete Kohärenzfunktion zwischen Empfangs- und Sendesignal im elektrischen Übertragungsfall, im interessierenden Frequenzbereich, somit Null oder mindestens nahe Null. Abbildung 14 ist beispielhaft für den Kopfhörer Sony MDR EX-35 LP angeführt. Alle anderen Kopfhörertypen weisen einen ähnlichen Verlauf der Kohärenzfunktion auf.

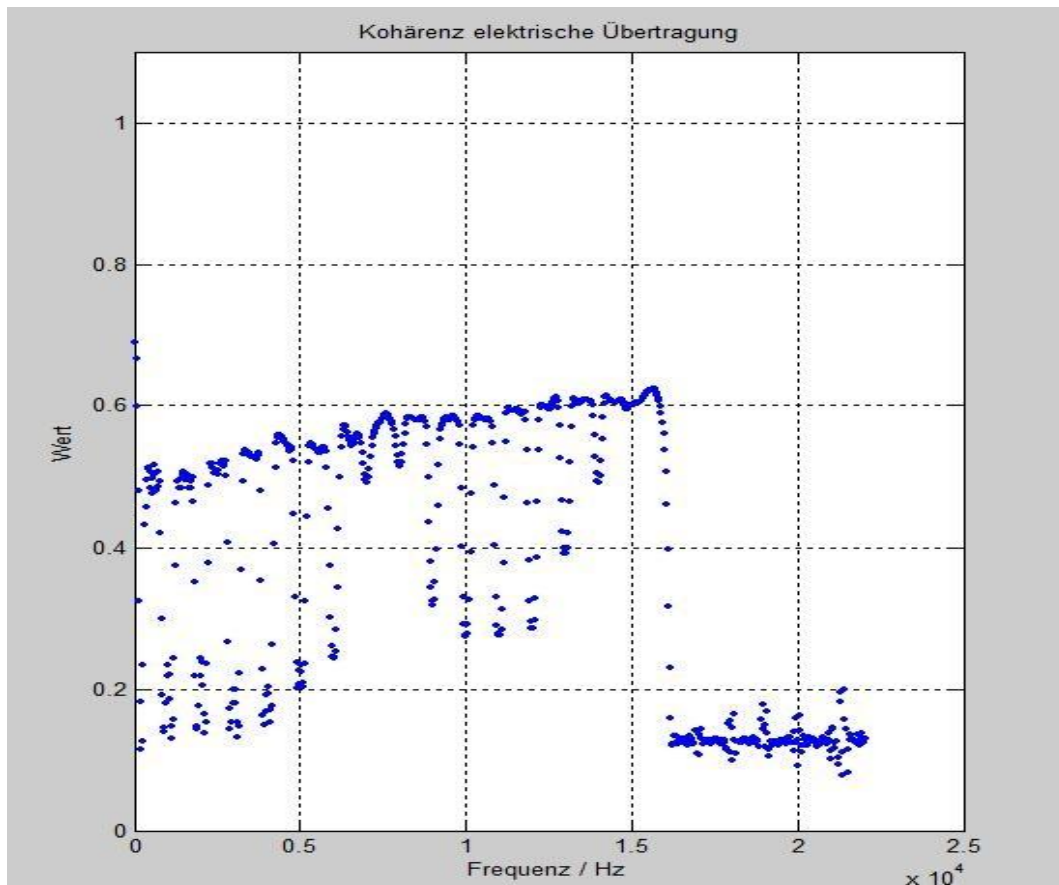


Abbildung 14: Kohärenz der Signale (elektrischer Übertragungsfall)

Abbildung 14 zeigt jedoch, dass die Kohärenz Werte bis zu 0,6 annimmt. Es ist also eine gewisse Ähnlichkeit zwischen beiden Signalen gegeben. Das ist nur dadurch zu erklären, dass Anteile des Kalibriersignals durch die Soundkarte oder die Messschaltung elektrisch auf dem Empfangskanal übertragen werden. Auch wird bei genauerer Untersuchung der Kohärenzfunktion deutlich, dass die Spitzenwerte der Kohärenz einem Intervall von ca. 1000Hz folgen. Es ist zu vermuten, dass diese Erscheinung auf Eigenschaften der Messschaltung zurückzuführen ist. So könnten mögliche unbeabsichtigte Schwingkreise, aus der Kombination der zur Abschirmung verwendeten Kondensatoren und den verbauten Kabeln, auf der Platine entstehen.

Um diesen Anteil des Signals, der nicht akustisch übertragen wird, nicht mit in die Berechnung des Übertragungsfaktors einzubeziehen, wird das Spektrum,

welches sich aus der FFT des vom Empfangskopfhörers im elektrischen Übertragungsfall aufgezeichneten Signals ergibt, vom Empfangsspektrum der akustischen Übertragung abgezogen. Würde man dieses nicht tun, könnte der errechnete Übertragungsfaktor einen leicht erhöhten Pegel aufweisen und wäre somit verfälscht.

Dieses Kalibriervorgehen muss, da jeder Kopfhörer anders in Kombination mit der Messschaltung reagiert, dann für alle anderen verwendeten Kopfhörermodelle wiederholt werden.

4.3. Messvorgang

Für die Messung werden beide Kopfhörer mittels Gummibändern an der Druckkammer angebracht und so ausgerichtet, dass sie bestmöglich das Kammervolumen gegenüber der Umgebung abdichten (Abb. 15).



Abbildung 15: Druckkammer mit Kopfhörer

Die Druckkammer wird dann zur besseren Abschirmung in den Faradayschen Käfig gesetzt. In Vorbereitung zur Messung muss das Stereo-Klinkenkabel der Messschaltung, welches an beide Verstärker geschaltet ist, in den Line-In-Kanal der Soundkarte gesteckt werden. Durch die Einstellung der Trimmwiderstände der einzelnen Instrumentenverstärker werden die Aufnahmepegel der Messkanäle so justiert, dass diese optimal ausgesteuert, aber nicht übersteuert sind. Die Widerstandswerte der Trimmwiderstände

müssen dann mittels eines Multimeters gemessen und zur späteren Bestimmung der Verstärkungsfaktoren protokolliert werden. Für jeden Kopfhörertyp muss bei den jeweiligen Messungen dieser Vorgang wiederholt werden. Kurz vor Beginn der Messung muss die Aufnahmesoftware AUDACITY[®] gestartet werden. Nun kann über den Line-Out-Kanal der Soundkarte das Messsignal in das Messsystem und auf den Sendekopfhörer geleitet werden. Es sollte bei der Messung darauf geachtet werden, dass möglichst keine akustischen Störungen aus der Umgebung das Messergebnis verfälschen. Nach Abspielen des Messsignals wird die Aufnahme in AUDACITY[®] gestoppt und das aufgezeichnete Signal mittels dieses Programmes so beschnitten, dass nur die interessierenden Signale als Wave-Datei gespeichert werden. Das aufgezeichnete Stereosignal wird dabei in zwei einzelne Wave-Dateien unterteilt und gespeichert.

4.4. Signalverarbeitung

Eine korrekte Signalverarbeitung ist besonders wichtig für eine genaue Darstellung und Auswertung der Messdaten. So könnte durch eine fehlerhafte Verarbeitung der Messdaten selbst das beste und genaueste Messsystem zu fehlerhaften Messergebnissen führen.

Die mathematische Auswertung der Rohdaten erfolgt im Programm MATLAB[®]. Dort werden jeweils nur die Messdaten einer Messung eines betreffenden Kopfhörers verarbeitet, da eine Auswertung der Messwerte aller Kopfhörer in einem Schritt zu aufwendig und unübersichtlich wäre. Als erster Schritt werden die Wave-Dateien eines Messzyklus, bestehend aus dem über Instrumentenverstärker 1 gemessenen Sendesignal und dem über Instrumentenverstärker 2 gemessenen Empfangs- und Kalibriersignal, eingelesen. Für eine korrekte Skalierung der Daten werden diese eingelesenen Zeitsignale durch den jeweiligen Verstärkungsfaktor (Formel 4.1) der Instrumentenverstärker dividiert. Es muss dabei darauf geachtet werden, dass für jeden neuen Messzyklus andere Verstärkungsfaktoren zu berücksichtigen sind. Ein angefertigtes Messprotokoll erleichtert dabei die Zuordnung der

Widerstandswerte. Die in der Signalerzeugung angewandte 1000-fache Wiederholung des erzeugten Zeitsignals kann nun in der Messwertauswertung dafür genutzt werden, eine Mittelung über eine große Anzahl von Spektren durchzuführen. Statistische Störeffekte wie Rauschen und eventuelle, von der Umgebung eingetragene Störsignale, werden so unterdrückt. Somit wird eine signifikante Steigerung der Genauigkeit der Messwerte erreicht.

Auch kann so auf eine einfache Rechteckfensterung des Spektrums zurückgegriffen werden, da es sich um ein ganzzahliges Vielfaches der Periode des Signals handelt.

Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass es in einem Messvorgang bei der Aufzeichnung und dem anschließenden zurechtschneiden der Wave-Dateien zu Fehler gekommen ist, die eine Verkürzung des Zeitsignals zu Folge gehabt haben, muss überprüft werden, ob noch über genau 1000 Spektren gemittelt werden kann.

Dazu wird das gesamte Zeitsignal durch eine Fast-Fourier-Transformation in den Frequenzbereich überführt. Diese erzeugte Fourier-Transformierte enthält nun die Anzahl aller Spektrallinien, die im positiven Frequenzbereich des gesamten Zeitsignals enthalten sind, sowie bedingt durch die symmetrischen Eigenschaften einer FFT, die gleiche Anzahl im negativen Frequenzbereich. Da die Zahl der Spektrallinien bekannt ist, die die Fourier-Transformierte eines einmalig abgespielten Zeitsignals enthält, kann man somit auf die Anzahl der insgesamt abgespielten Wiederholungen des Zeitsignals rückrechnen und erfährt dadurch, über welche Anzahl von Spektren eine Mittelung möglich ist. Für eine vollständige Mittelung über die 1000-fache Wiederholung sollte die gesamte Fourier-Transformierte des Zeitsignals 1378000 Spektrallinien (N_{Spkges}) enthalten.

$$N_{\text{Spkges}} = n_W \cdot n_{\text{Spklin}} \cdot 2 \quad (4.3)$$

$$N_{\text{Spkges}} = 1000 \cdot 689 \cdot 2 = 1378000$$

n_{Spklin} steht für die Anzahl der 689 Spektrallinien, die durch das Erzeugen eines Spektrums von 32Hz bis 22048Hz im Abstand von 32Hz entstehen, multipliziert mit der Anzahl n_w der Wiederholungen (1000) sowie mit 2 für die Anzahl der Spektrallinien im negativen Frequenzbereich. In der Auswertung aller Messdaten zeigte sich, dass alle Fehler, die durch das Zuschneiden der Wave-Dateien entstanden sind, so gering waren, dass stets eine Mittelung über 1000 Spektren möglich war. Die Zeitsignale eines Messzyklus werden somit in 1000 gleichgroße Abschnitte zerlegt und für jedes dieser Abschnitte wird eine FFT durchgeführt. Über eine arithmetische Mittelung und das Entfernen des negativen FB wird nun ein Mittelwertspektrum für den positiven Frequenzbereich der Sende-, Empfangs- und Kalibriersignale erzeugt. Die erzeugten Spektren enthalten jeweils nur die Pegelwerte des 32Hz-Intervalls. Mit diesen positiven und gemittelten Spektren kann jetzt der Übertragungsfaktor der Kopfhörer errechnet werden. Somit ergibt sich aus Formel 3.5 mit den Formeln 3.6 und 3.3 die Formel für den Übertragungsfaktor zu:

$$M = \sqrt{\frac{U_i \cdot j\omega \cdot V_0}{I_j \cdot \kappa \cdot P_0}}$$

Bzw. mit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

$$M = \sqrt{\frac{U_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_0}{I_j \cdot \kappa \cdot P_0}} \quad (4.4)$$

U_i steht dabei für die Leerlaufempfangsspannung, I_j für den Sendestrom, P_0 ist der Normaldruck von 101325Pa, der in und um die Druckkammer herrscht. κ ist der temperaturabhängige Isentropenexponent (1,4 für trockene, 20°C warme Luft), V_0 ist das Volumen der Druckkammer und f die Frequenz.

Die Ergebnisse aus der Berechnung von Formel 4.4 werden in MATLAB[®] grafisch ausgegeben.

4.5. Fehlerbetrachtung

Im Verlaufe der verschiedenen Messungen sind einige aufgezeichnete Signale durch Störungen, die innerhalb der Messschaltung oder durch Störquellen von außen entstanden, beeinflusst worden. Wie schon angesprochen, sind die größten Störungen, die in das Messsystem eingetragen werden, elektromagnetische Störungen und die Übertragung von Signalanteilen auf beide Messkanäle durch die Soundkarte. So konnten unter ungünstigen Bedingungen Radiosignale mit dem Messsystem empfangen werden. Die verwendeten Kopfhörer fungierten, bedingt durch eine schlechte bzw. nichtvorhandene Abschirmung, in diesen Fällen wohl als Empfangsantenne für diese elektromagnetischen Wellen. Es waren außerdem systeminterne Schwingungen zu beobachten, die besonders bei 1kHz und dessen Vielfachem hohe Störpegel erzeugten (Abb. 16).

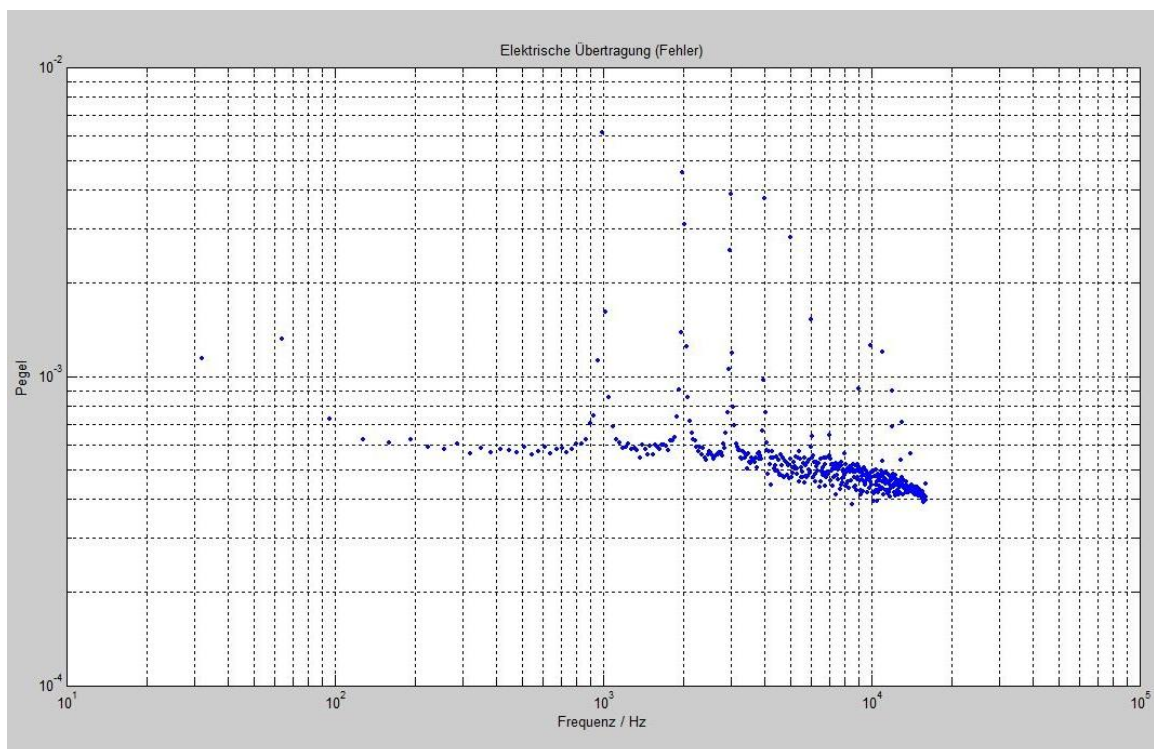


Abbildung 16: rein elektrisch empfangener Störpegel

Durch eine ungünstige Stromversorgung konnte dieser Effekt verstärkt werden. Die beiden verwendeten 9V-Blockbatterien waren in diesem Fall nicht gleichstark geladen und somit war keine hundertprozentig symmetrische Spannungsversorgung gegeben. Die Differenz zwischen den erzeugten Spannungen lag bei ca. 1V. Wie genau dieser Effekt durch eine fehlerhafte Spannungsversorgung entstand, ist bisher nicht zu klären gewesen. Desweiteren konnte man in manchen Fällen durch Berührung der Faradayschen Käfige mit der Hand einen sprunghaften Anstieg der aufgezeichneten Rauschsignale erzeugen. Diese waren manchmal selbst nach Loslassen der Faradayschen Käfige noch vorhanden. Nach Abschalten und Wiederinbetriebnahme des Messsystems konnten diese Rauscheffekte jedoch nicht mehr wahrgenommen werden.

Eine weitere Quelle für Störungen waren Verkippungen der Kopfhörerkapseln an der Druckkammer. So entstanden Undichtigkeiten der Kopfhörer gegenüber der Druckkammer. Dadurch kann ein frequenzabhängiger Einbruch des Übertragungsfaktors erzeugt werden.

Alle durch diese Fehlerquellen verursachten Verfälschungen des Übertragungsfaktors werden im Kapitel 7 betrachtet und Strategien benannt, die eine Minderung der Ausprägung der Fehler herbeiführen.

5. Auswertung Messungen

In der Auswertung sind unter den einzelnen Kopfhörermodellen jeweils nur die Messergebnisse mit den höchsten Übertragungsfaktoren und den abschätzungsgemäß geringsten Messfehlern abgebildet. Alle Diagramme besitzen eine logarithmische Einteilung der Ordinate sowie eine logarithmisch dargestellte Frequenzachse, um Erscheinungen in tiefen Frequenzbereichen besser sehen zu können. In den weiteren Darstellungen sind je zwei Übertragungsfunktionen erkennbar. Diese stellen zum Einen die Messergebnisse (in den Diagrammen blau dargestellt) dar, die mit dem in dieser Diplomarbeit beschriebenen Messsystems erzielt wurden und zum Anderen die Messergebnisse (in den Diagrammen rot dargestellt), die Herr Dr. Andreas Wilde mit denselben Kopfhörern und unter Anwendung der Druckkammer-Reziprozitätskalibrierung erreichte. Herr Wilde nutzte zur Verstärkung der Signale einen Messverstärker und zur Analyse der Messsignale einen Spektralanalysator von Brüel & Kjær.

5.1. Koss "The Plug"

Der Kopfhörer "The Plug" von Koss besitzt zur besseren Abdichtung des Gehörgangs gegenüber der Umwelt zwei abnehmbare Schaumstoffaufsätze. Diese wurden zur Messung abgenommen, da die Druckkammer sonst mit dem Schaumstoffmaterial gefüllt gewesen wäre und so eine schlechte Schallausbreitung die Folge gewesen wäre. Für einen optimalen Sitz dieser Kopfhörer zur Druckkammer ist in der Kunststoffplatte, die alle verwendeten Druckkammern beherbergt, eine 3mm-Bohrung eingebracht. Diese sollte für alle Messungen mit den Kopfhörern von Koss verwendet werden. Es zeigte sich aber bei den Vorversuchen, dass sich unter Verwendung dieser kleinen Druckkammer ein deutlich abweichender Verlauf zur von Herrn Wilde errechneten Übertragungsfunktion ergibt. Ursache dafür ist, dass die Kopfhörerkapseln das Druckkammervolumen, welches zur Berechnung der akustischen Impedanz herangezogen wird, verändern. Dieser Effekt wird in

Kapitel 7.2.4 noch genauer beschrieben. Deshalb sind alle weiteren Messungen für dieses Kopfhörermodell in derselben Druckkammer (\varnothing 10mm) durchgeführt worden, die auch Herr Wilde nutzte.

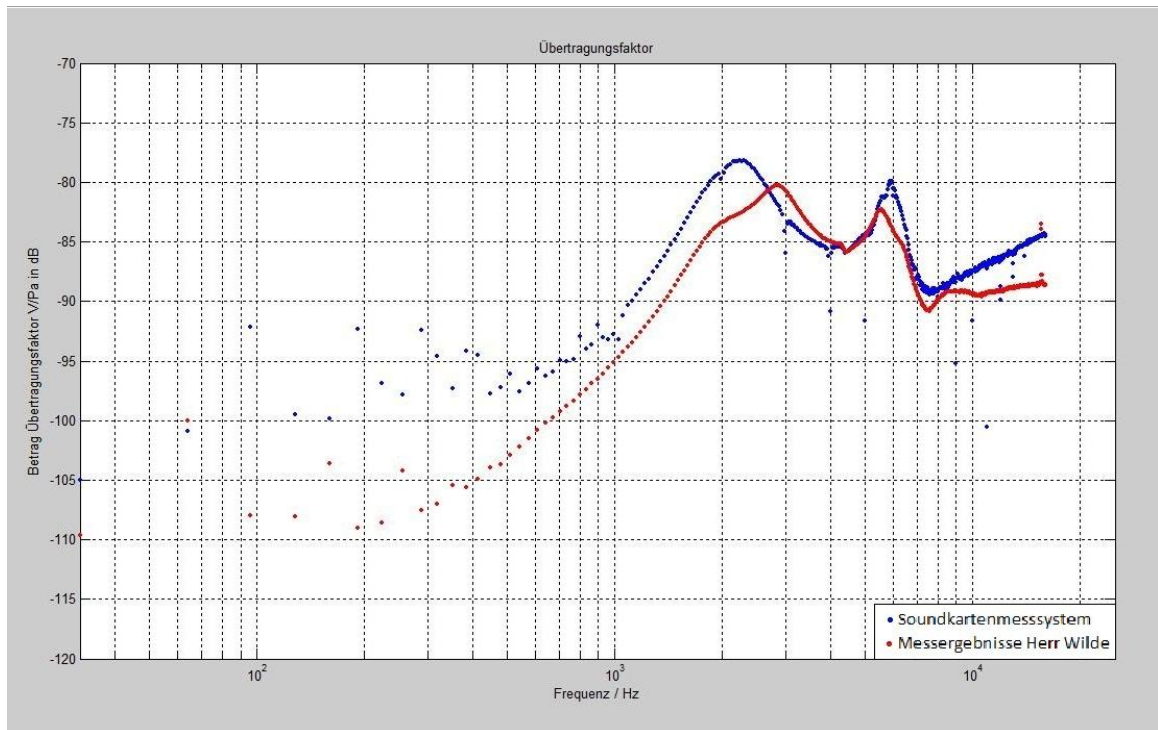


Abbildung 17: Übertragungsfunktion Koss "The Plug"

In Abbildung 17 zeigt sich für die blaue Kurve im Frequenzbereich unterhalb von ca. 400Hz ein recht diffuser Verlauf. Ein ähnliches, jedoch deutlich schwächer ausgeprägtes Verhalten weist die Kurve der roten Übertragungsfunktion auf. Somit kann man annehmen, dass dieser Effekt durch die Kopfhörer bzw. in deren Kombination mit der Druckkammer entsteht. Bei 64Hz beträgt die Differenz nur etwa 0,5dB, wohingegen sich bei 192 Hz eine Differenz von ca. 16dB ergibt. Da die Pegel in diesem Bereich sehr kleine Werte aufzeigen, kann man davon ausgehen, dass das Messsystem solch kleine Pegel nicht mehr optimal verarbeiten kann. Oberhalb von 400Hz ist der Verlauf der blauen ÜF deutlich glatter. Allgemein zeigt sich beim Vergleich der beiden Kurven, dass die rote Funktion zur blauen etwas verschoben und leicht gestaucht zu sein scheint. Besonders deutlich wird dies an den beiden

Pegelspitzen der blauen ÜF bei ca. 2,2kHz und 6kHz. Der Spitzenwert bei 2,2kHz ist um etwa 800Hz nach links und der Wert bei 6kHz ist um etwa 700Hz nach rechts gegenüber den maximalen Werten der roten ÜF verschoben. Eine mögliche Begründung dafür könnte sein, dass bei den Messungen von Herrn Wilde die Kopfhörer für die Dauer der Messungen mit den Händen an die Druckkammer gehalten wurden. Es kann dadurch nicht ausgeschlossen werden, dass einige der Luftdruckausgleichskanäle an der Rückseite der Hörerkapseln mit den Fingern verschlossen wurden (siehe Abb. 18).



Abbildung 18: Rückseite Koss "The Plug"

Eine Verschiebung und Stauchung der ÜF wäre eine mögliche Folge des Verschlusses der Ausgleichskanäle. Die blaue Kurve liegt von 400Hz bis etwa 2kHz relativ konstant rund 3,5dB über der roten ÜF. Ob dies die Folge einer möglichen Verschiebung der ÜF ist, kann nicht mit absoluter Sicherheit gesagt werden. Eine genaue Aussage, welche der beiden Messungen der tatsächlichen Kopfhörerübertragungsfunktion am ehesten entspricht, soll eine Vergleichsmessung ermöglichen.

Im Bereich von 3kHz bis 5,5kHz liegen die ÜF sehr nahe beieinander. Die maximale Abweichung beträgt dort ca. 1,5dB. Von 4kHz bis 5,5kHz sind beide Kurven nahezu deckungsgleich. Auch ist der leichte Einbruch von 1dB bei 4300Hz bei beiden ÜF identisch ausgeprägt. Oberhalb von 5,5kHz ist wieder

eine deutlich höhere Differenz der Beträge der ÜF erkennbar. Die Spitze der blauen Kurve ist bei 6kHz um 2,5 dB stärker ausgeprägt und im Frequenzbereich etwas nach rechts verschoben. Ab 6,5kHz nähern sich die Werte wieder an. Bis 8kHz sind beide Verläufe, bis auf kleine Abweichungen, sehr ähnlich. Oberhalb von 8kHz ist der Anstieg der blauen ÜF gegenüber der roten, fast konstant verlaufenden ÜF deutlich stärker. Im Bereich von 16kHz ist dadurch eine Differenz von 4,5dB erkennbar.

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass beide im Diagramm dargestellten ÜF sehr ähnlich verlaufen. In einigen Frequenzbereichen sind jedoch Abweichungen erkennbar, die wohl durch Fehler zu erklären sind, die entweder im Messsystem ihre Ursache haben oder durch ein unbeabsichtigtes Verfälschen des Abstrahlverhaltens der Kopfhörerkapseln begründet sind. Eine klare Aussage über das Verhalten der ÜF für dieses Kopfhörermodell kann erst mittels einer Vergleichsmessung getroffen werden.

Die Übertragungsfunktion, die mit dem in dieser Diplomarbeit vorgestellten Messsystem errechnet wurden, liegt im gut auswertbaren Frequenzbereich von 1kHz bis ca. 8,5kHz, bei Pegeln zwischen -90dB und -77dB.

5.2. Sony MDR E828 LP

Diese Sony-Kopfhörer besitzen im Gegensatz zu allen anderen verwendeten Kopfhörermodellen keine Applikationen an den Kopfhörerkapseln, die sich an die Gehörgangform des Nutzers anpassen. Die für diese Modelle verwendete Druckkammer (Ø 12mm) besitzt daher eine dünne Umrandung aus Silikon um eine bessere Abdichtung gegenüber der Umgebung zu erreichen. Diese sollte daher auch den tatsächlichen Nutzungsbedingungen im menschlichen Ohr etwas besser entsprechen als eine Druckkammer ohne zusätzliche Abdichtung. Die Messung von Herrn Wilde (rote ÜF) wurde in einer Druckkammer mit 10mm Durchmesser und ohne Silikonabdichtung durchgeführt. Es sind durch die zusätzliche Abdichtung, der verwendeten Druckkammer, für die Messungen des hier vorgestellten Messsystems (blaue ÜF) leicht höhere Pegel für die Übertragungsfunktion zu erwarten.

Als Erstes fällt im Vergleich zum Diagramm (Abb. 17) des Kopfhörers "The Plug" auf, dass die ÜF des Kopfhörers Sony E828 (Abb. 19) einen deutlich glatteren Verlauf aufweist. Nur einige wenige Ausreißer, meist bei den Vielfachen von 1000Hz, unterbrechen diesen glatten Eindruck. Das lässt vermuten, dass der recht diffuse Verlauf des Kopfhörers "The Plug" (Abb. 17) im tiefen Frequenzbereich an den sehr kleinen Pegeln liegt, die vom verwendeten Messsystem nicht optimal verarbeitet werden können. Die wenigen Abweichungen vom glatten Verlauf der blauen ÜF (Abb. 19) sind durch das Abziehen des elektrisch empfangenen gemittelten Störpegelspektrums vom akustisch empfangenen Spektrum zu erklären. Wie schon in Kapitel 4.5 erwähnt, handelt es sich bei den markanten Störpegeln bei 1kHz und dessen ganzzahligem Vielfachen um systeminterne Schwingungen, die mit in das akustisch empfangene Signal eingestreut werden.

Die Verläufe der beiden ÜF sind von 32Hz bis zu 1kHz nahezu identisch. Sie weisen in diesem Frequenzbereich nur eine relativ konstante Differenz von etwa 3,5dB auf. Es ist aber festzustellen, dass in diesem Bereich die Beträge der blauen Kurve entgegen der Erwartung unterhalb der roten Kurve liegen.

Ab 1kHz nähert sich die blaue ÜF der roten immer mehr an, bis sie sich von 1,3kHz bis etwa 2,5kHz fast überlagern. Die Differenz zwischen den Beträgen ist in diesem Bereich kleiner als 0,5 dB. Bei 2kHz beginnt die blaue ÜF die andere Funktion zu überragen. Dieser Trend setzt sich bis rund 8,5kHz fort. Auch in dieser Fourier-Transformierten ist der Verlauf beider Faktoren, bis auf eine Verschiebung des Spitzenwertes bei 2,1kHz gegenüber der roten Kurve um etwa 250Hz, sehr ähnlich, sie weichen um 1 bis 4dB ab. Wie schon in Abb. 15 weist die blaue Funktion des Sony-Kopfhörers oberhalb von 9kHz einen höheren Anstieg auf als die auch hier nahezu konstant verlaufende rote Kurve.

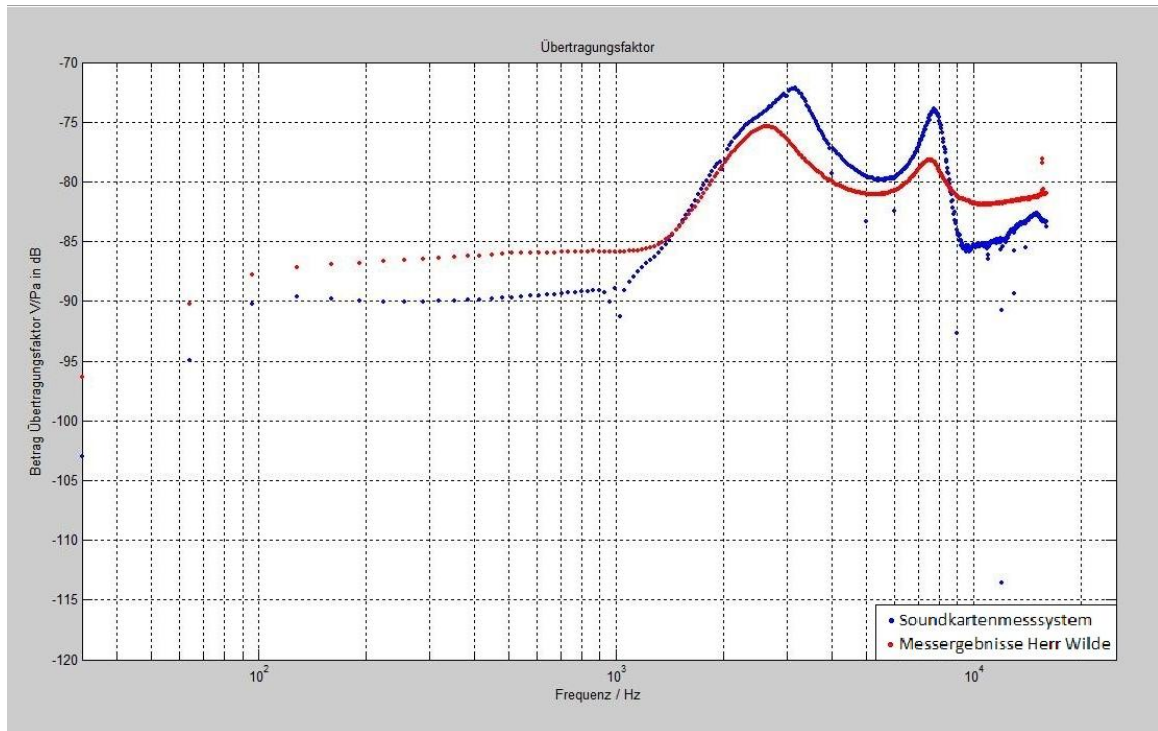


Abbildung 19: Übertragungsfunktion Sony MDR E828 LP

Dennoch ist festzuhalten, dass sich die Messergebnisse der beiden verschiedenen Messsysteme sehr ähneln. Überwiegend sind sie in etwa identisch und weisen nur geringe Abweichungen der Pegel zueinander auf. Höhere Pegel der blauen Fourier-Transformierten im Bereich von 2kHz bis 8,5kHz sind durch die besser abdichtende Anbindung der Hörerkapseln zur Druckkammer erklärbar. Die Beträge der blauen ÜF sind im Bereich von ca. 100Hz bis 9kHz zwischen -90dB und -72dB.

5.3. Sony MDR E828 LP alt

Dieser in diesem Kapitel betrachtete Kopfhörer Sony MDR E828 LP (alt) ist baugleich zum Kopfhörer, der in Kapitel 5.2 behandelt wurde. Er unterscheidet sich jedoch in seinem Alter und der Gebrauchsdauer zum vorherigen betrachteten Exemplar. Der zuvor ausgewertete Kopfhörer ist als nahezu fabrikneu anzusehen, da er nicht in seiner eigentlichen Funktion gebraucht wurde, sondern nur zu Messzwecken diente. Der jetzt betrachtete Hörer wurde

mehrere Monate im alltäglichen Gebrauch verwendet. Da es sich um gleiche Kopfhörertypen handelt, könnten Unterschiede im Verlauf der blauen ÜF in Abb. 19 und 20 durch Fabrikationstoleranzen oder Alterungseffekt erklärt werden. Mögliche Unterschiede geben nur einen groben Hinweis, ob derartige Effekte zum Tragen kommen. Um eine sichere Aussage darüber treffen zu können, ob dieses einen Einfluss auf die Übertragungsfaktoren hat, müssten weitere Untersuchungen mit einer größeren Bandbreite baugleicher Kopfhörer gemacht werden. Diese soll nicht Teil dieser Diplomarbeit sein.

Gemessen wurden diese Kopfhörer ebenfalls in der Druckkammer mit 12mm Durchmesser und Silikonumrandung.

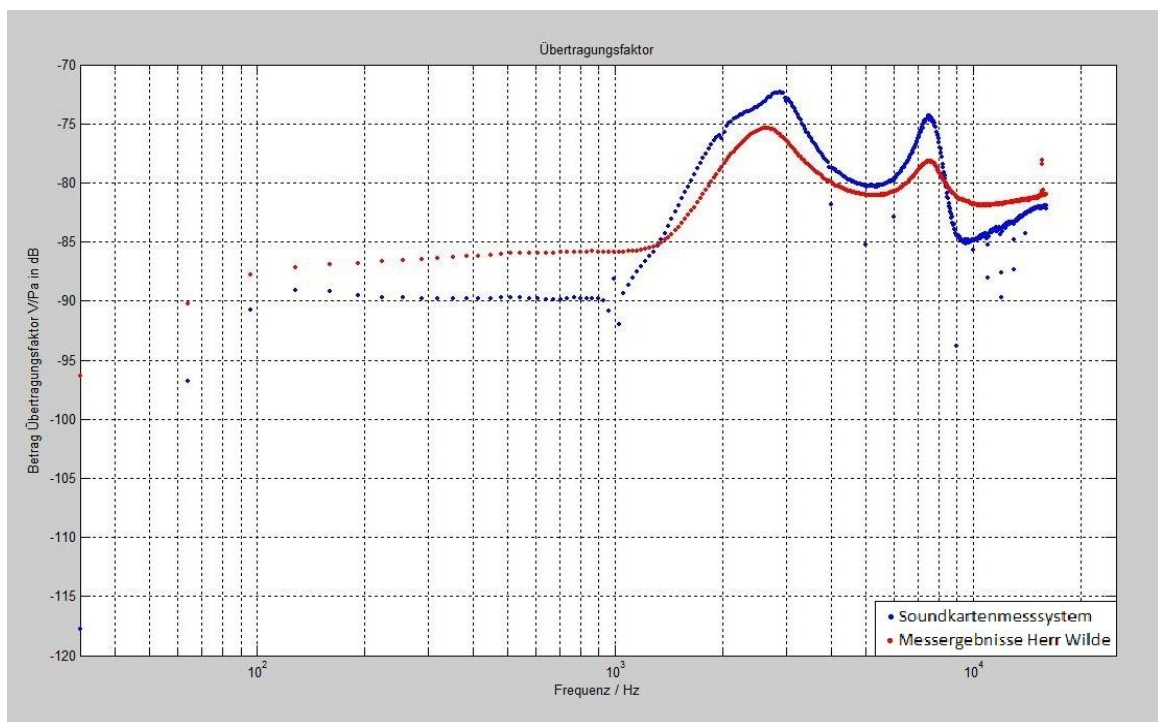


Abbildung 20: Übertragungsfunktion Sony MDR E828 LP alt

Beim Betrachten von Abb. 20 zeigt sich, dass bei einer Frequenz von 32Hz die Differenz zwischen beiden aufgetragenen Funktionen sehr hoch ist. Sie beträgt in etwa 21dB. Die Pegel im FB oberhalb von 32Hz bis ca. 1000Hz weisen hier einen recht ähnlichen Verlauf auf. Jedoch wird auch hier deutlich, dass die Erwartung, durch die Silikonabdichtung der Druckkammer breitbandig einen höheren Pegel gegenüber den Messungen von Herrn Wilde zu erzielen, für

diesen tiefen bis mittleren FB nicht erfüllt wurde. Die blaue ÜF liegt im Bereich von 1,2kHz bis 8kHz konstant über den Messergebnissen, die in der Druckkammer ohne Abdichtung ermittelt wurden. Betragsmäßig äußert sich die bessere Abdichtung durch einen in etwa 1-3,5dB höheren Pegel gegenüber der roten ÜF. Der Spitzenwert der blauen Funktion bei 2,8kHz weist eine etwas kleinere Frequenzverschiebung gegenüber der zweiten Funktion auf, als der im vorherigen Kapitel betrachtete neuere Kopfhörer Sony E828. Die ÜF der neueren Messungen besitzt bei 9kHz einen deutlich höheren Einbruch der Pegel, als es bei der roten Funktion der Fall ist. Wiederum ist der bisher typische Anstieg der blauen Kurve über der Frequenz von 9kHz ersichtlich.

Es bleibt auch hier festzuhalten, dass beide in Abb. 20 aufgetragenen Funktionen einen ähnlichen Verlauf haben und somit beide genutzten Messsysteme recht ähnliche Messergebnisse erzeugen. Die Beträge der blauen ÜF sind schon, wie bei den vorherigen betrachteten Kopfhörern, im gleichen FB von ca. 100Hz bis 9kHz auch zwischen -90dB und -72dB.

Abb. 21 zeigt den Vergleich der Übertragungsfunktion der beiden gemessenen Kopfhörer E828 von Sony. Man erkennt sehr gut den über die gesamte betrachtete Frequenzbandbreite von 32Hz bis 16kHz nahezu identischen Verlauf.

Einen großen Unterschied zwischen beiden Funktionen gibt es nur bei 32Hz. Dort liegt zwischen beiden Kopfhörern 13,5dB. Der ältere Kopfhörer hat bei dieser Frequenz also einen deutlich schlechteren Übertragungsfaktor. Im weiteren Verlauf ergeben sich nur geringe Abweichungen der beiden ÜF. Maximal beträgt die Differenz 2dB. Im Bereich von 1kHz bis 3kHz liegt die rote Funktion, also die des Kopfhörers mit der längeren Betriebsdauer, leicht über der Blauen. Von 3kHz bis 5,5kHz sind die Verhältnisse umgekehrt. Hier ist die rote ÜF in den Beträgen leicht kleiner. Danach sind beide Verläufe wieder fast identisch.

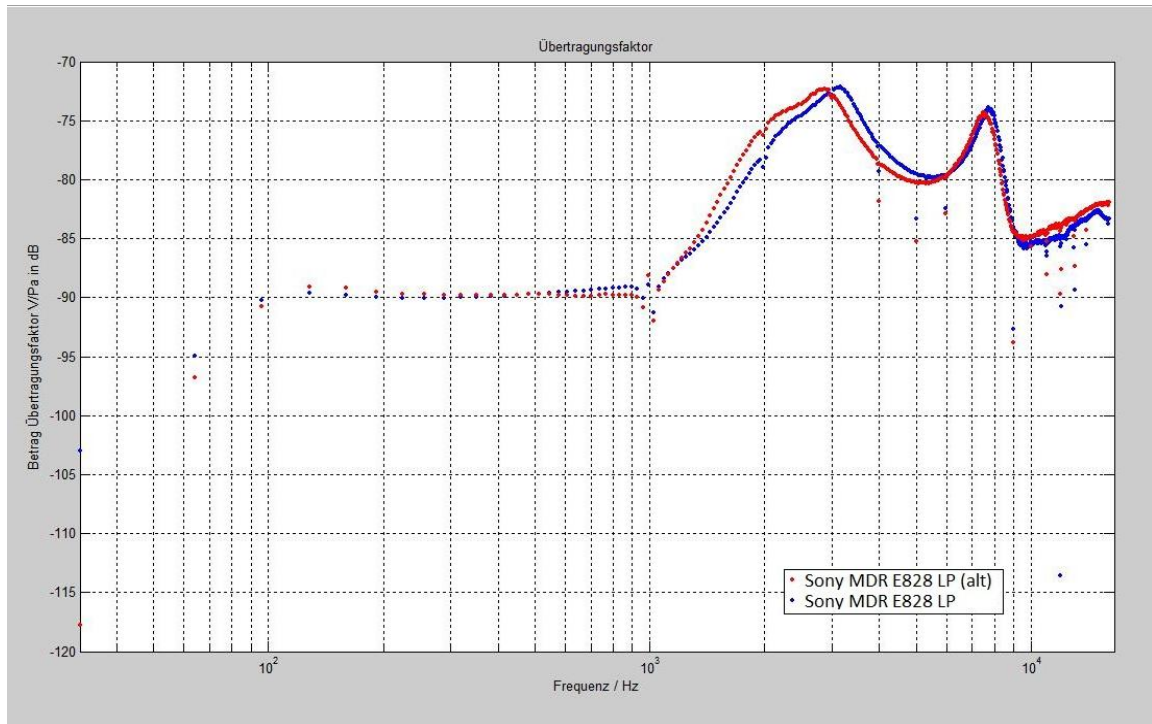


Abbildung 21: Vergleich der Übertragungsfunktion Sony E828/ Sony E828 alt

Die Ursachen für die geringen Abweichungen können nicht genau eingeordnet werden: es könnten hier Alterungseffekt oder Fertigungstoleranzen zugrunde liegen. Da es sich jedoch um so geringe Unterschiede handelt, sind diese beiden Effekte für den Nutzer im alltäglichen Gebrauch nur von geringer Bedeutung. Mögliche Ursache könnte auch eine leicht andere Anbindung der Kopfhörer an die Druckkammer sein. Um eine genauere Einordnung zu ermöglichen, könnten weitere und statistisch sicherere Untersuchungen angestellt werden.

5.4. Sony MDR EX35 LP

Die in diesem Kapitel betrachteten Kopfhörer besitzen, wie schon die Hörer von Koss, abnehmbare Applikationen, die eine bessere Abdichtung der Hörkapseln in den Gehörgängen gegen die Umgebung ermöglichen. Auch diese wurden für die Messungen abgenommen. Durch die kleinen Abmessungen der Kapseln musste eine Druckkammer mit einem etwas geringeren Durchmesser zur

Messung verwendet werden. Für eine gute Abdichtung wurde der Druckkammer (\varnothing 4mm) eine Silikonumrandung angefügt.

Im Vergleich zu allen anderen vorher angestellten Auswertungen zeigt Abb. 23 eine deutlich geringere Übereinstimmung der beiden aufgetragenen Funktionen. Nur im Bereich von 2kHz bis 7kHz lassen sich Ähnlichkeiten der Funktionen erkennen.

Bei allen Messungen von Herrn Wilde wurde eine Druckkammer mit einem Durchmesser von 10mm verwendet. So ist der große Unterschied in den Beträgen in den Frequenzbereichen von 32Hz bis 2kHz und von 7kHz bis 16kHz, vermutlich durch die schlechte Abdichtung der Kopfhörer Sony MDR EX35 LP gegenüber dieser Druckkammer zu erklären. Die Hörerkapseln haben nur einen Durchmesser von ca. 4mm, sowie eine Tiefe von 6mm. Dadurch berühren sich beide Kopfhörerkapseln in der Mitte der Druckkammer und dichten diese Kammer gegenüber der Umgebung nicht ab (siehe Abb. 22 bzw. Abb. 42).

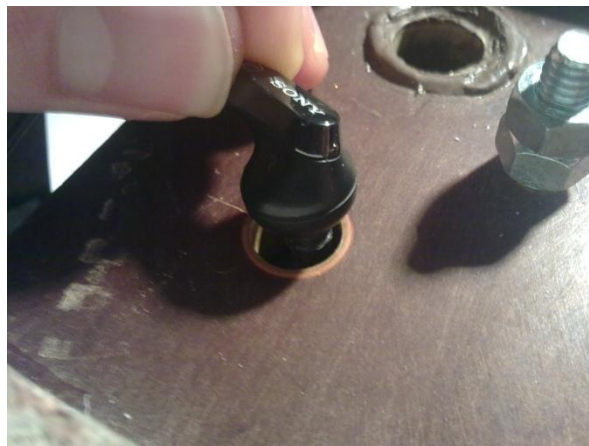


Abbildung 22: Kopfhörer Sony EX35 LP in 10mm Druckkammer

So entspricht die akustische Impedanz, die zur Berechnung der roten ÜF herangezogen wurde, nur sehr ungenügend der akustischen Impedanz, die tatsächlich in der Druckkammer bei der Messung herrschte. Somit wäre auch die ÜF etwas verfälscht.

In den Bereichen, in denen die Verläufe der beiden Funktionen sehr ähnlich sind, existieren nur kleine Differenzen zwischen den Pegeln. Von 2kHz bis 7kHz

heißt das in Zahlen ausgedrückt eine Abweichung von ca. 0,5dB bis 4dB. Ein Vergleich zwischen den beiden Funktionen ist in den anderen Frequenzbereichen, bedingt durch die schon oben beschriebenen, nicht optimalen Aufnahmebedingungen, nicht sinnvoll.

Die im tiefen Frequenzbereich liegenden Pegel der blauen ÜF sind, wie schon in den vorherigen Diagrammen, leicht diffus dargestellt. Auch in diesem Fall sind die Pegel im tiefen Frequenzbereich für eine optimale Verarbeitung durch das verwendete Messsystem zu klein.

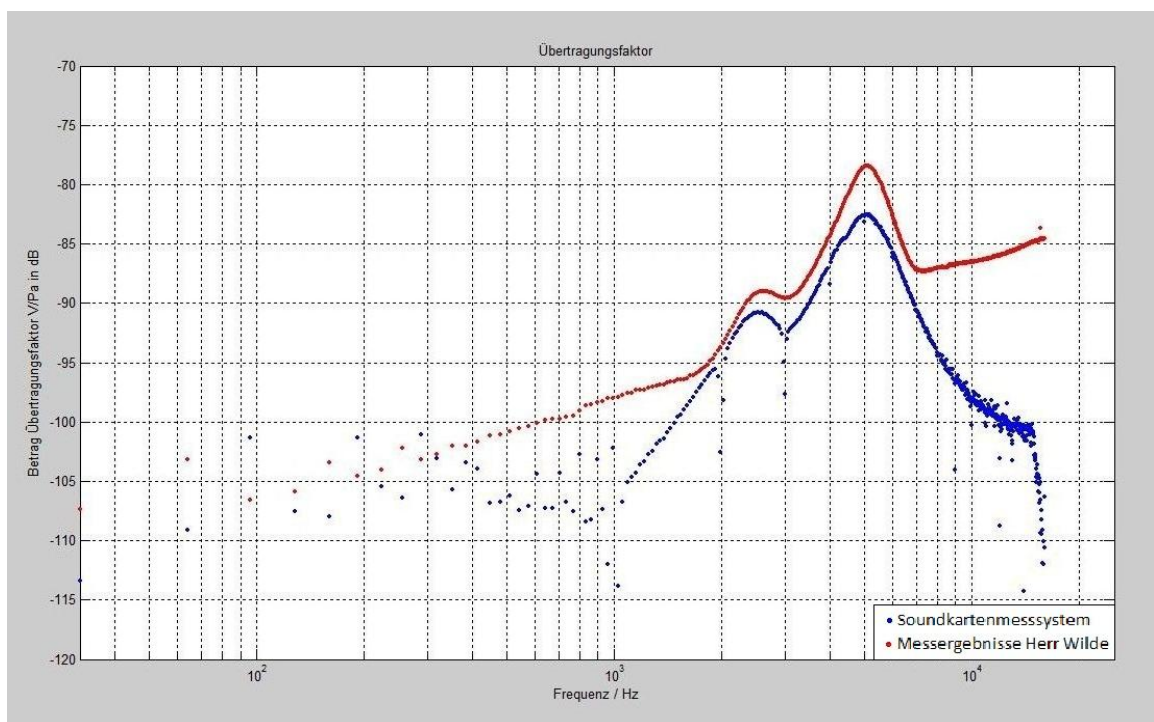


Abbildung 23: Übertragungsfunktion Sony MDR EX35 LP

5.5. Vergleich der Kopfhörermodelle

In Abb. 24 sind die Übertragungsfunktionen der verschiedenen Kopfhörermodelle, die mit dem in dieser Diplomarbeit erarbeiteten Messsystem gemessen wurden, aufgetragen. Die dargestellten Funktionen zeigen alle einen etwa gleich großen, durch das verwendete Messsystem verursachten, Einfluss von elektrischen Effekten. Besonders gut zeigen sich diese Effekte jeweils bei 4kHz und 5kHz. Dort brechen die Pegel, bedingt durch das Abziehen des

elektrischen Störpegelspektrums, bei allen Kopfhörern um etwa denselben Betrag ein. Beide Sony E828 Hörer sowie der Kopfhörer von Koss zeigen im hohen FB von ca. 7kHz (Koss) bzw. von 9kHz (Sony E828) einen nahezu konstanten Anstieg der ÜF an. Ursächlich sind dafür vermutlich die genutzten Druckkammern des Durchmessers von 10mm und 12mm, die durch ihr Volumen in diesem FB Resonanzen zulassen. Hingegen erzeugt die kleinere Druckkammer von 4mm Durchmesser beim Kopfhörer Sony EX35 keinen derartigen Effekt. Für diesen Hörer bricht die ÜF bei hohen Frequenzen erwartungsgemäß ein.

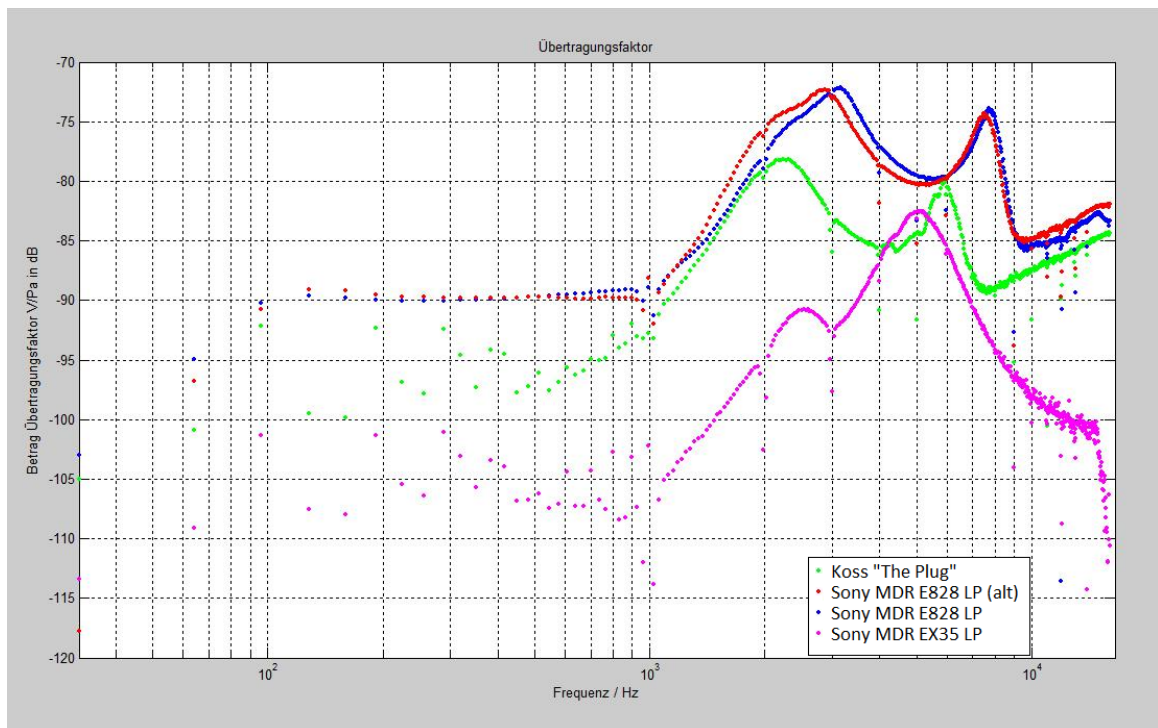


Abbildung 24: Vergleich Übertragungsfunktionen

Der direkte Vergleich aller Funktionen zeigt auch die sehr unterschiedliche Ausprägung der Spitzenwerte der Kopfhörertypen sowie die sehr verschiedenen Verläufe der Kurven. Es sind große Verschiebungen im Frequenzbereich zwischen den Spitzenpegeln erkennbar. Die Kopfhörer des Modells Sony EX35 besitzen ihr Maximum bei einer Frequenz von 5kHz, die des Herstellers Koss zeigen einen maximalen Übertragungspegel bei rund

2,2kHz und beide Sony E828-Hörer übertragen das akustische Signal im Bereich von 3kHz am besten.

Auch sind recht große Differenzen zwischen den Pegeln der verschiedenen ÜF festzustellen. Die Pegel sind z.B. bei ca. 1kHz beim Sony EX35 um etwa 15dB geringer als die des Koss-Kopfhörers und um etwa 17-20dB geringer als die Pegel der beiden Sony E828-Modelle.

6. Vergleichsmessungen

Um eine Aussage über die Güte der Messergebnisse, die mit dem Messsystem bestehend aus Druckkammer, Soundkarte und Messschaltung erzielt wurden, treffen zu können, sind Vergleichsmessungen mit einem bewährten Messsystem sinnvoll. Um solche Vergleichsergebnisse zu bekommen, wurden mit den genutzten Kopfhörermodellen Messungen an einem Kunstkopf, sowie Messungen mit einem Brüel & Kjær ½ Zoll-Mikrofon an einer Druckkammer durchgeführt.

6.1. Vergleichsmessungen mit einem Kunstkopf

Messungen an einem Kunstkopf haben den Vorteil, dass dieser durch Nachbildungen der beiden menschlichen Ohrmuscheln, der Gehörgänge und der Trommelfelle eine Näherung des menschlichen Hörorgans darstellt. So können die tatsächlichen Bedingungen, unter denen die Kopfhörer bei normaler Benutzung arbeiten, in vereinfachter Form nachgestellt werden. Die Ohrmuschel und der Gehörgang werden dabei durch vereinfachte Gummimodelle nachgebildet. Je ein Mikrofon am Ende der beiden künstlichen Gehörgänge stellt dabei das Trommelfell und das daran anschließende Innenohr des Menschen dar.

Durch Messung an solch einem Kunstkopf sollten die Messergebnisse der Druckkammer-Reziprozitätskalibrierung verifiziert werden. Dabei ist von Interesse, ob die Bedingungen, unter denen die Reziprozitätskalibrierung durchgeführt wurde, ähnliche Messergebnisse erzeugten, wie die Kunstkopfmessungen. Bei annähernd gleichen Ergebnissen der beiden Messsysteme kann angenommen werden, dass das entwickelte System die akustischen Eigenschaften eines Gehörgangs gut widerspiegelt und somit eine Näherung des tatsächlichen Nutzungsfalles im Ohr darstellt.

Die Vergleichsmessungen wurden an einem Kunstkopf (im weiteren KK abgekürzt) der Firma Head Acoustics (Abb. 25), der durch die Hochschule Mittweida zur Verfügung gestellt wurde, durchgeführt.



Abbildung 25: Verwendeter Kunstkopf

Der verwendete KK besaß für beide Mikrofone unterschiedliche Impedanzen. Das linke Mikrofon hatte dabei eine Impedanz, die auf Messungen von ohrfernen Schallquellen ausgelegt war. Das rechte Mikrofon war so konfiguriert, dass dessen Impedanz Aufnahmen von ohrnahen Schallquellen ermöglichte. Somit konnten zur Berechnung des Übertragungsfaktors nur Messdaten herangezogen werden, die vom rechten Mikrofon aufgenommen wurden. Die Daten des linken Mikros würden zu einer verfälschten Darstellung der Übertragungsfunktion führen.

Alle gemessenen Kopfhörer sind darauf ausgelegt, in den Eingang des Gehörgangs eingesteckt zu werden. Diese Einsteckkopfhörer benötigen für einen guten Sitz also eine möglichst realitätsgetreue Nachbildung des Gehörgangs. Der durchschnittliche äußere Gehörgang eines Menschen hat einen Durchmesser von etwa 7-9mm. Die Gehörgangnachbildungen des KK hatten jedoch nicht die geeignete Größe, um die Hörerkapseln einstecken zu können. Deshalb wurde der rechte Kopfhörer mittels eines umgebauten Kapselgehörschutzes (Abb. 26) so nah wie möglich an das Ohrmikrofon herangeführt und bestmöglich gegenüber diesem ausgerichtet.

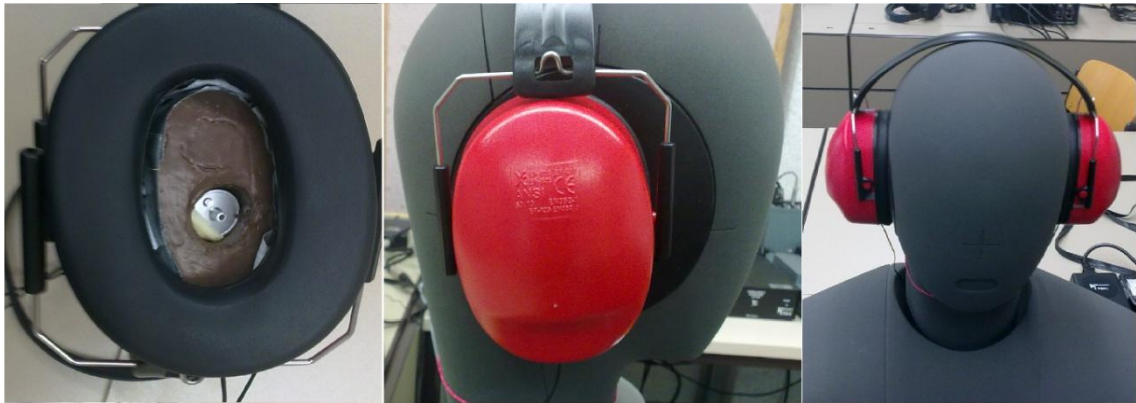


Abbildung 26: Modifizierter Kapselgehörschutz

Das Sendesignal ist dasselbe Signal wie bei der Reziprozitätskalibrierung. Über die Soundkarte eines Rechners wurde dieses Signal in den jeweiligen Kopfhörer eingespielt. Das Signal des Kunstkopfmikrofons wurde an einem Messrechner durch das Programm ARTEMIS[®] aufgezeichnet und verarbeitet. Die Übertragungsfunktion errechnete sich dabei aus dem gesendeten und dem aufgezeichneten Schallsignal, mittels der in ARTEMIS[®] implementierten Funktion „transfer function“. Bei ersten Auswertungen der ermittelten Funktionen vor Ort zeigte sich jedoch, dass die Bedingungen, unter denen die Messungen gemacht wurden, ungeeignet für eine Errechnung einer aussagekräftigen und zu vorangegangenen Messungen vergleichbaren Übertragungsfunktion waren. So war keinerlei Ähnlichkeit zwischen den Ergebnissen der Reziprozitätskalibrierung und denen der Kunstkopfmessungen erkennbar. Ursache dafür sind die relativ großen Abstände zwischen dem Hörer und dem Mikrofon gewesen. Der Abstand zwischen diesen betrug etwa 4cm. Solch ein Abstand führt in dem eingeschlossenen Luftvolumen zwischen Hörer und Mikrofon schon bei Frequenzen von 2,5kHz zu Resonanzen ($\lambda/4$ Resonator). Auch das Volumen zwischen Gehörschutzkapsel und der Kopfhörerhalterung trägt zu diesem Effekt der Resonanz bei. Somit ist mit den Messergebnissen dieses Messsystem kein Vergleich zu den Messergebnissen des entwickelten Messsystems möglich. Es kann so keine Aussage über die Güte des Soundkartenmesssystems getroffen werden.

6.2. Vergleichsmessungen mit ½ Zoll-Mikrofon

Da durch die vorangegangenen Messungen mit dem Kunstkopf kein Vergleich zwischen beiden Messsystemen zulässig war, bedarf es einer weiteren Messreihe mit einem Messsystem, das möglichst unter gleichen Bedingungen, wie sie bei der Druckkammer-Reziprozitätskalibrierung vorherrschten, misst. Deshalb wurden Messungen der Übertragungsfunktion mit einem ½ Zoll Mikrofon von Brüel & Kjær und der Druckkammer, die bei den bisherigen Reziprozitätskalibrierungen genutzt wurde, durchgeführt. Auch diese benötigten messtechnischen Geräte wurde durch die Hochschule Mittweida zur Verfügung gestellt.

In diesen Messungen wurde je eine der beiden Kopfhörerkapseln des jeweiligen Kopfhörermodells an der Druckkammer mit 12mm Durchmesser angebracht, welche dort als Lautsprecher fungiert. Im Gegensatz zu den vorigen Druckkammer-Reziprozitätskalibrierungen wird die Aufgabe der Aufnahme des Empfangssignals nicht durch die andere Kopfhörerkapsel, sondern durch das B&K-Mikrofon übernommen. Dieses Mikrofon wurde für die Dauer der Messungen per Hand an die Druckkammer gehalten. Dadurch können größere Schwankungen der Pegel in der Messung entstehen, da so eine dauerhaft gleichbleibende Abdichtung des Mikrofonkopfes zur Druckkammer nicht gewährleistet werden kann. Die Kopfhörerkapsel wird wieder durch Gummibänder an der Druckkammer fixiert.

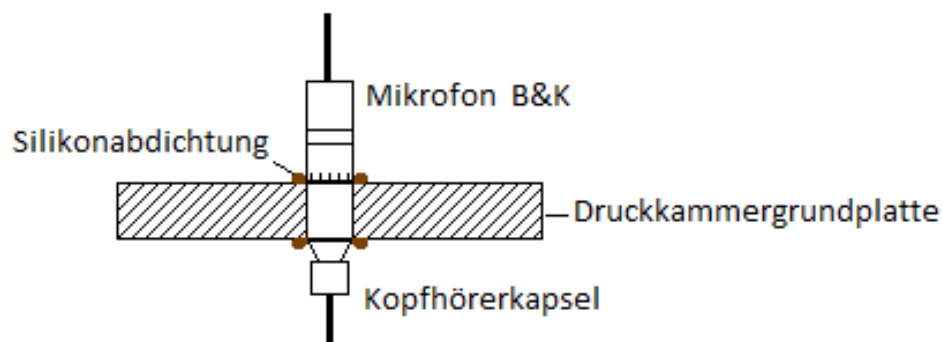


Abbildung 27: Darstellung des Messaufbaus der Mikrofonmessungen in einer Druckkammer

Die Abdichtung beider Schallwandler gegen die Umgebung wird durch die beidseitig angebrachte Silikonfuge verbessert (Abb. 27).

Zur Messung konnte, bedingt durch die Größe des Mikrofons, nur die 12mm Druckkammer genutzt werden. Das Kalibriersignal wird direkt von der Soundkarte eines Notebooks auf den Sendekopfhörer geleitet.

Beim gesendeten Kalibriersignal handelt es sich um die Wave-Datei, wie sie in Kapitel 4.1.4 beschrieben wurde. Aufgezeichnet wird das Mikrofonsignal durch einen Messrechner mit dem Programm ARTEMIS®. ARTEMIS® wandelt die aufgezeichneten Daten in das Wave-Format. Dieses ermöglicht die Auswertung der Daten und einen direkten Vergleich mit den Messdaten des Soundkartenmesssystems in dem Programm MATLAB®.

Die Auswertung dieser Daten erfolgt in MATLAB® dabei nach demselben Verfahren wie bei den vorherigen Druckkammermessungen.

Als Signal des Sendestroms, das zur Berechnung der Übertragungsfunktion benötigt wird, dient die Wave-Datei, die vom Rechner auf den Kopfhörer geleitet wurde. Als Signal der Leerlaufempfangsspannung wird das vom B&K-Mikrofon aufgezeichnete und in eine Wave-Datei umgewandelte Zeitsignal genutzt.

Die Formel 4.4 zur Berechnung der Übertragungsfunktion muss jedoch, bedingt dadurch, dass die Annahme gleicher Übertragungsfunktionen beider Schallwandler in diesen Messungen nicht zutrifft, umgestellt werden. So besitzt das verwendete Mikrofon eine Empfindlichkeit von 50mV/Pa und wurde nicht verstärkt. Die Formel zur Berechnung der Übertragungsfunktion lautet daher:

$$M_K = \frac{U_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_0}{I_j \cdot K \cdot P_0 \cdot M_M} \quad (6.1)$$

M_K steht hier für die interessierende Übertragungsfunktion des Kopfhörers. M_M ist in der Formel die Übertragungsfunktion des Mikrofons (50mV/Pa). Alle anderen Symbole sind zu Formel 4.4 äquivalent.

Bedingt dadurch, dass das entwickelte Messsystem möglichst einfach und kostengünstig aufgebaut sein sollte, wurde auf eine Absolutkalibrierung dieses Systems verzichtet. Auch hätte diese Kalibrierung keine bedeutende Steigerung

der Genauigkeit der Messergebnisse erzielt. Eine Absolutkalibrierung des Mikrofons wäre auch nicht sinnvoll, da kein Vergleich zu absolut kalibrierten Messdaten des Soundkartenmesssystems möglich ist. Diese fehlende Kalibrierung hat jedoch den Nachteil, dass ein direkter Vergleich der Pegel der Übertragungsfunktion zwischen beiden Messsystemen nicht möglich ist. Es können so nur die Verläufe der verschiedenen Funktionen miteinander verglichen werden. Dennoch erlaubt dieser Vergleich der Verläufe eine Aussage über die Güte des entwickelten Soundkartenmesssystems, da die zu erwartenden Pegelwerte mit einer Absolutkalibrierung in ähnlichen Größenordnungen liegen sollten.

6.2.1. Auswertung Vergleichsmessung Koss "The Plug"

Abbildung 28 zeigt den Vergleich der Übertragungsfunktionen, die mit den verschiedenen Messsystemen ermittelt wurden. Die Kurve der Vergleichsmessung mit dem ½ Zoll-Mikrofon weist, bedingt durch die fehlende Absolutkalibrierung, deutlich geringere Pegel gegenüber den beiden anderen aufgetragenen Funktionen auf. Da ein Vergleich der Pegelwerte zwischen den Funktionen nicht möglich ist, wurde diese im Diagramm grün dargestellte Kurve, soweit verschoben, bis sie annähernd den gleichen Mittelwert wie die Kurve des Soundkartenmesssystems aufwies. Für die Übertragungsfunktionen der Vergleichsmessungen aller weiteren Kopfhörermodelle wurde gleich verfahren. Dieses erleichtert den Vergleich aller Kurvenverläufe. Grundsätzlich lässt sich erkennen, dass sich zwischen der blauen und grünen Funktion in einem großen Frequenzbereich deutlich größere Ähnlichkeiten im Verlauf ergeben als dieses beim Vergleich zwischen roter und grüner Kurve der Fall ist. Die Übertragungsfunktion der Vergleichsmessung zeigt im tiefen Frequenzbereich ein deutlich glatteres Verhalten, selbst bis zu sehr tiefen Pegeln. Die Spitzenpegel von der Vergleichsmessung und der Soundkartenmessungen liegen, bis auf geringe Abweichungen, im Frequenzbereich fast übereinander. Der Spitzenwert der grünen Kurve liegt bei ca. 2,1kHz, der der blauen Kurve bei etwa 2,3kHz. Auch das zweite lokale Maximum der Kurve bei ca. 6kHz liegt bei grün und blau deutlich dichter beieinander. Die Differenz beträgt nur rund

200Hz. Grün und Rot trennt dort etwa eine Differenz von 1kHz. Die Differenz der Pegel zwischen dem Spitzenwert bei 2kHz und dem minimalen Pegel der Senke bei ca. 4,5kHz ist in der Funktion der Vergleichsmessung deutlich größer als bei der Funktion des Soundkartenmesssystems.

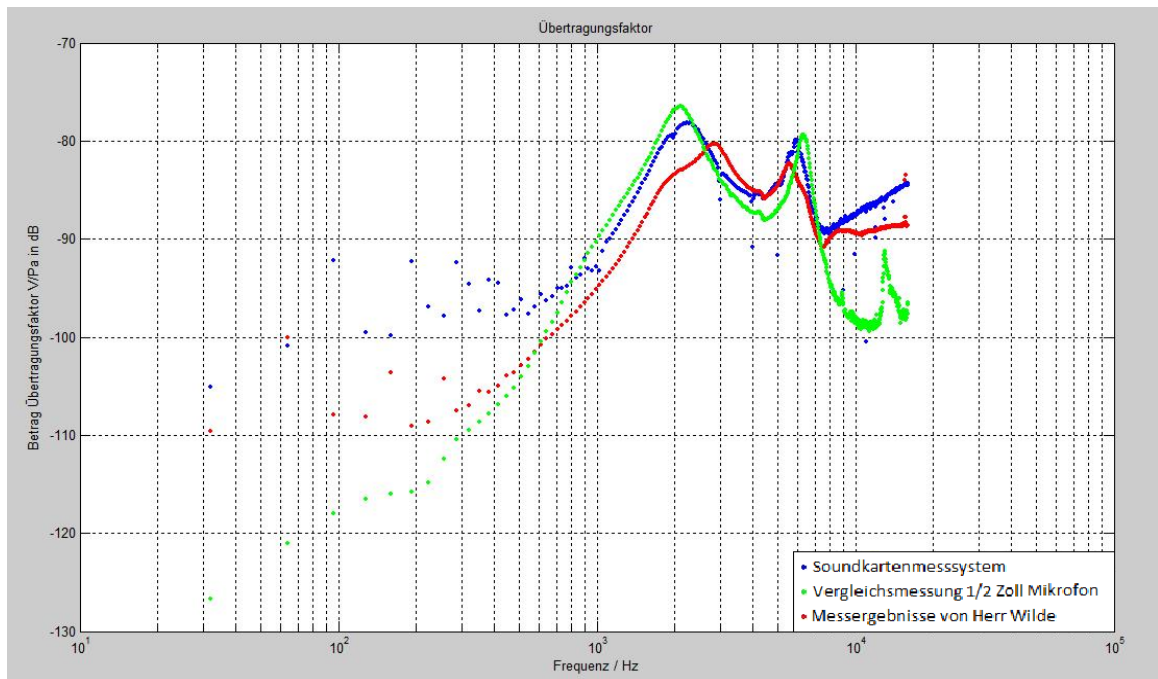


Abbildung 28: Vergleich der Koss' The Plug'-Übertragungsfunktionen der verschiedenen Messsysteme

Möglicher Grund für diese Erscheinung könnte die deutlich bessere Sensitivität des Mikrofons für die Schallaufzeichnung gegenüber der Kopfhörerkapsel sein. Ab 7kHz zeigt die grüne Kurve einen deutlich Einbruch der Pegelwerte auf. Dieser Verlauf entspricht dadurch deutlich mehr der zu erwartenden Übertragungsfunktion, als dieses die beiden anderen Funktionen tun. Wahrscheinlich wird das verwendete Mikrofon deutlich geringer durch mögliche Resonanzen in diesem hohen Frequenzbereich in der Druckkammer beeinflusst als die Hörerkapseln in den vorangegangenen Messungen. Erst bei rund 13kHz zeigt sich ein sprunghafter Anstieg der grünen Übertragungsfunktion, der sich durch Resonanzeffekte innerhalb der Druckkammer erklären lässt. Es bleibt also festzuhalten, dass die Vergleichsmessungen im Frequenzbereich von

1kHz bis 7kHz einen ähnlichen Verlauf zur Übertragungsfunktion des Soundkartenmesssystems aufweisen. Dies lässt den Schluss zu, dass das entwickelte Messsystem für das hier betrachtete Kopfhörermodell in diesem Frequenzbereich recht sichere und vertrauenswürdige Messergebnisse liefert.

6.2.2. Auswertung Vergleichsmessung Sony MDR E828

Der Vergleich der Übertragungsfunktionen (Abb. 29) dieses Kopfhörermodells zeigt etwas größere Abweichungen der Verläufe. Besonders im tiefen Frequenzbereich sind die Unterschiede sehr deutlich. So zeigt die grüne Kurve nicht den relativ flachen Verlauf im Frequenzbereich von 32Hz bis 1000Hz wie die beiden anderen Übertragungsfunktionen. Auch besteht eine Verschiebung zwischen der blauen und der grünen Übertragungsfunktion im Frequenzbereich zwischen 1kHz und 3kHz. Der Spitzenpegel der Vergleichsmessung liegt bei etwa 2,4kHz und der Spitzenpegel der Übertragungsfunktion des Soundkartenmesssystems bei rund 3,2kHz. Es ergibt sich also zwischen beiden Funktionen eine Verschiebung von rund 800Hz. Dass es sich dabei um einen Effekt handelt, der durch eine leicht andere Position des Kopfhörers oder des Mikrofons verursacht wird, kann nicht ausgeschlossen werden. Jedoch zeigten alle Messergebnisse, die jeweils mit leicht anderen Positionen der beiden Schallwandler an der Druckkammer gemacht wurden, einen ähnlichen Verlauf der Übertragungsfunktionen der Vergleichsmessung dieses Kopfhörermodells. Oberhalb von 3,5kHz bis ca. 7kHz zeichnen sich alle Funktionen wieder durch einen ähnlichen Verlauf aus. Bei 8kHz sind nur minimale Verschiebungen im Frequenzbereich der Spitzenpegel zu erkennen. Auch in dieser Auswertung zeigt die grüne Funktion wieder deutlich besser den zu erwartenden fallenden Verlauf der Pegel im hohen Frequenzbereich. Bei ca. 12kHz sind erneut Resonanzeffekte in der Übertragungsfunktion der Vergleichsmessung erkennbar. Trotz der etwas geringeren Ähnlichkeiten zwischen den Übertragungsfunktionen des Soundkartenmesssystems und der Vergleichsmessung kann für das entwickelte Messsystem auch eine relativ große Genauigkeit der Messergebnisse angenommen werden.

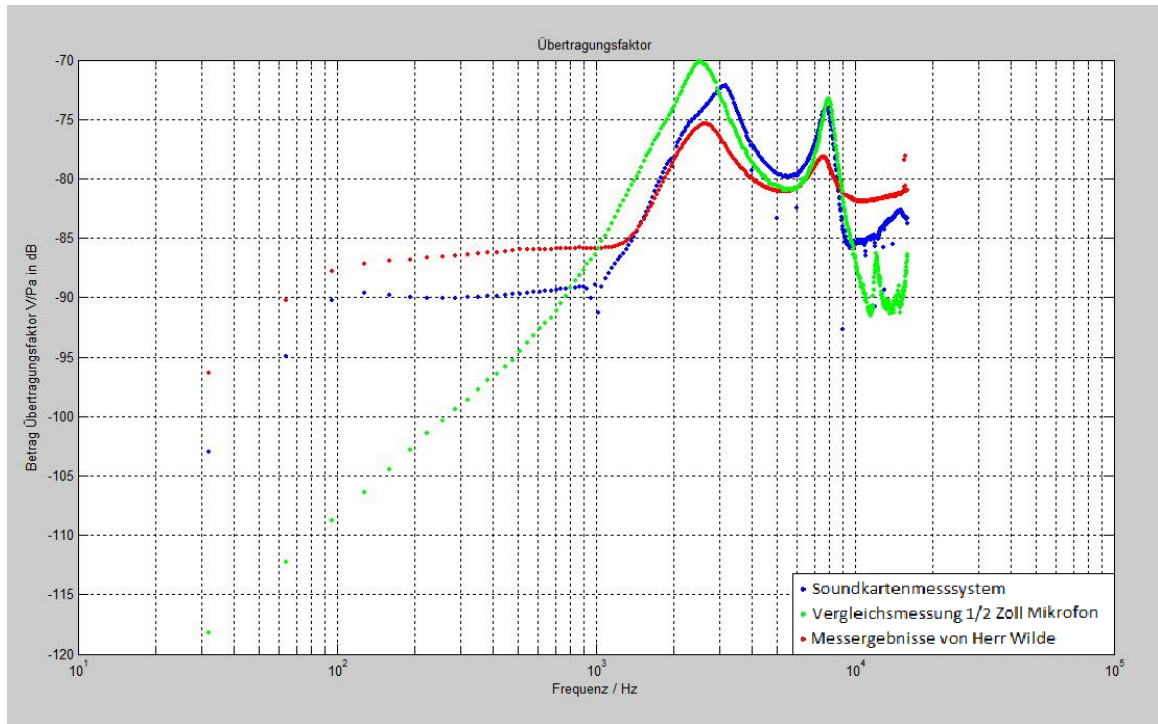


Abbildung 29: Vergleich der Sony MDR E828-Übertragungsfunktionen der verschiedenen Messsysteme

6.2.3. Auswertung Vergleichsmessung Sony MDR E828 alt

Wie schon in der vorherigen Auswertung zeigt die Vergleichsmessung im tiefen Frequenzbereich einen deutlich stärkeren Anstieg als die beiden anderen Übertragungsfunktionen. Im Bereich von 1kHz bis 2kHz sind die blaue und die grüne Übertragungsfunktion nahezu identisch. Auch zeigt sich erneut, dass die Spitzenpegel der Vergleichsmessung und der blauen Funktion im Frequenzbereich zueinander verschoben sind. Von 3kHz bis 8kHz sind die Verläufe recht ähnlich. Nur die Ausprägung der Senke von 4kHz bis 6 kHz ist bei der Kurve der Vergleichsmessung stärker. Das Mikrofon ist hier vermutlich durch seine höhere Sensibilität in der Lage, eine differenziertere Auflösung der Pegel zu ermöglichen. Oberhalb von 9kHz ist wieder ein Einbruch der Pegel der Vergleichsmessung erkennbar. Jedoch gibt es nicht den deutlichen durch Resonanzen verursachten Anstieg der Pegel um 13kHz wie zuvor. Resonanzen scheinen die Pegel dennoch in hohen Frequenzbereichen zu beeinflussen.

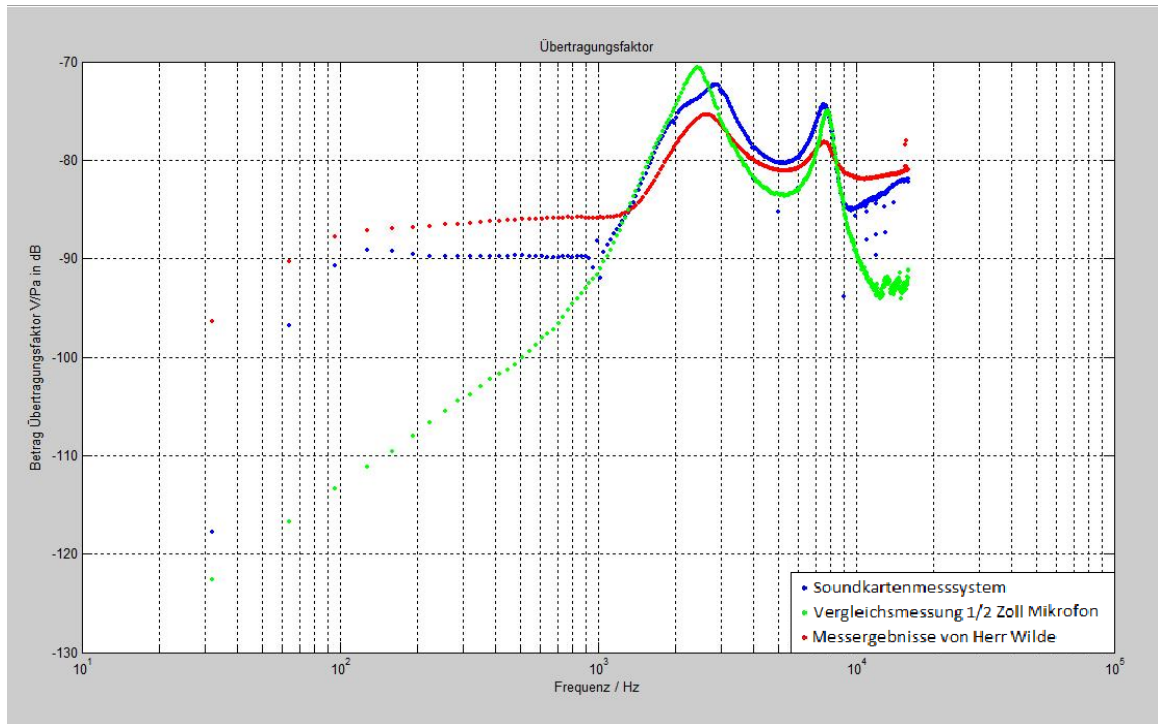


Abbildung 30: Vergleich der Sony MDR E828 alt-Übertragungsfunktionen der verschiedenen Messsysteme

Trotz der Unterschiede in den Ausprägungen der Pegel der verschiedenen Übertragungsfunktionen lässt sich eine grundsätzliche Ähnlichkeit aller drei Kurven zueinander erkennen. Ein gewisser Anteil der Differenzen lässt sich durch kleine Unterschiede bei der Positionierung der Kopfhörerkapsel an der Druckkammer begründen.

6.2.4. Auswertung Vergleichsmessung Sony MDR EX35

Bei diesem Kopfhörermodell sind die geringsten Übereinstimmungen der Übertragungsfunktionen erkennbar. Die Verläufe der grünen und blauen Funktion sind nur im Frequenzbereich von 2 kHz bis 9 kHz ähnlich. Die rote Übertragungsfunktion ist sogar nur von 2 kHz bis 6 kHz zu beiden anderen Kurven vergleichbar. Jedoch zeigen blaue und grüne Funktion in hohen Frequenzbereichen einen deutlich ähnlicheren Verlauf als dieses bei allen vorher betrachteten Kopfhörermodellen der Fall war. Resonanzen zeigen sich aber auch hier ab einer Frequenz von 14 kHz.

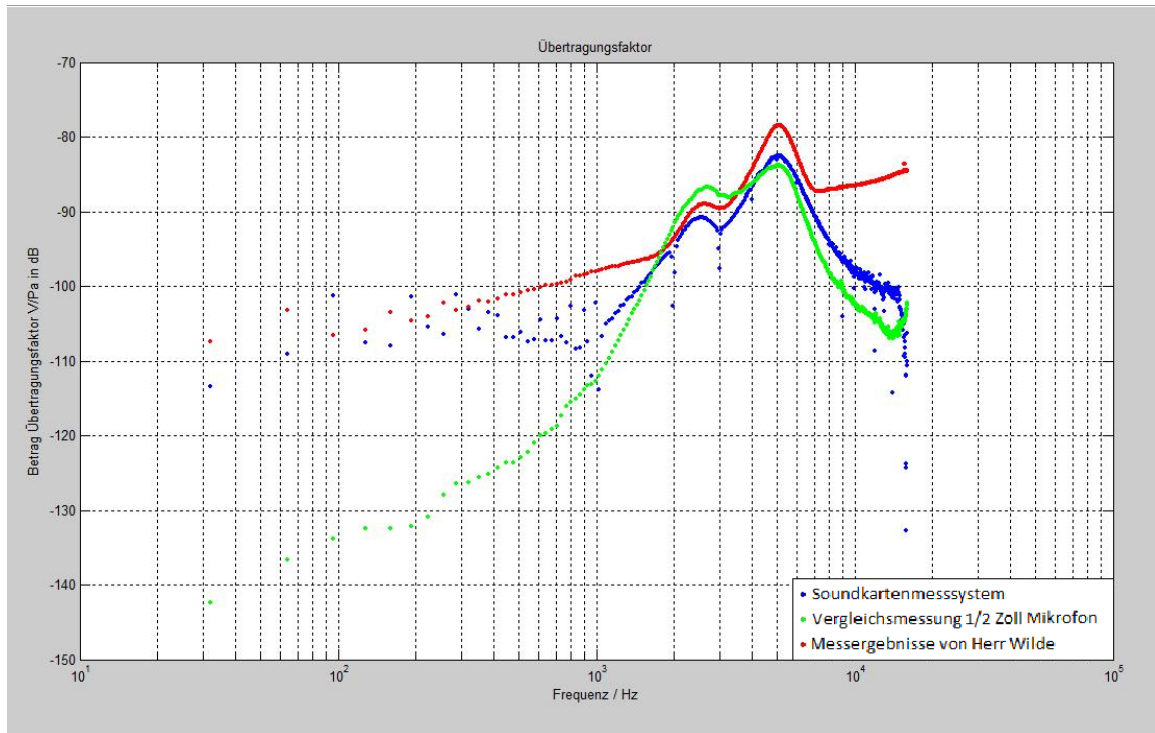


Abbildung 31: Vergleich der Sony MDR EX35 Übertragungsfunktionen der verschiedenen Messsysteme

6.3. Vergleich der Übertragungsfunktionen linke/rechte Kopfhörerkapseln

Die Berechnung der Übertragungsfunktion für die Messungen mit dem Soundkartenmesssystem kann nur bedingt durch die Annahme der Gleichheit dieser Übertragungsfunktion für beide Schallwandler eines gemessenen Kopfhörerpaars erfolgen. Sobald ein größerer Unterschied zwischen den Wirkungsgraden der Schallabstrahlung der beiden Schallwandler existiert, kann diese Annahme nicht mehr gelten. Der Kopfhörer mit der geringeren und somit schlechteren Übertragungsfunktion würde die Messung dahingehend verfälschen, dass man maximal dessen Übertragungsfunktion für beide Schallwandler erreichen würde. Ein schlechterer Wirkungsgrad in der Schallabstrahlung eines der beiden Kopfhörer hätte eine um denselben Grad schlechtere Schallaufnahme dieses Hörers zur Folge.

Um die Richtigkeit dieser getroffenen Annahme und somit auch die Richtigkeit der erfolgten Messungen zu überprüfen, werden im Folgenden Vergleiche zwischen den einzelnen Kopfhörerkapseln eines Hörermodells angestellt.

Dazu wurden bei der Vergleichsmessung mit dem ½ Zoll-Mikrofon von Brüel & Kjær jeweils beide Hörer eines Kopfhörerpaars in der Druckkammer vermessen.

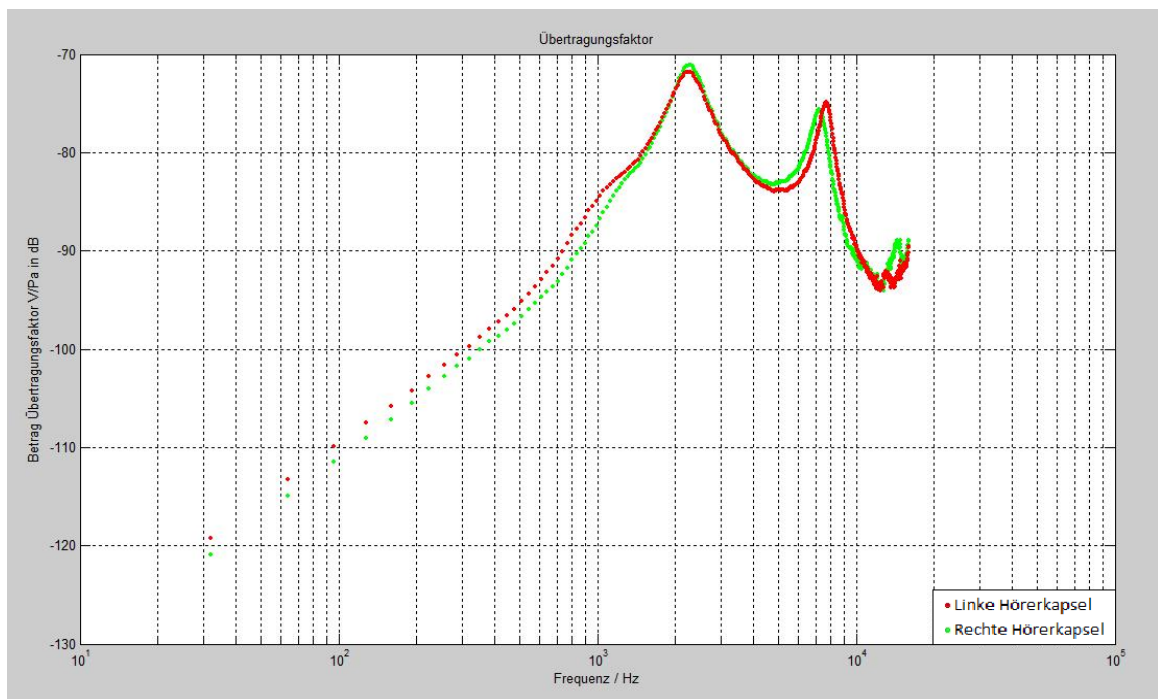


Abbildung 32: Vergleich der Übertragungsfunktion Sony MDR E828 alt Hörerkapsel links und rechts

Da bei beiden Messungen der Hörerkapseln jeweils die gleichen Bedingungen herrschten und das Messsystem nach gleichen Messparametern arbeitete, ist ein direkter Vergleich der Pegelwerte beider Funktionen auch ohne Absolutkalibrierung des Systems möglich.

Abbildung 32 zeigt den Vergleich der Übertragungsfunktionen der beiden Kopfhörerkapseln des älteren Sony MDR E828-Kopfhörers. Beide Funktionen sind über die gesamte betrachtete Frequenzbandbreite bis auf sehr geringe Unterschiede in den Pegelwerten nahezu identisch. Eine leichte Verschiebung im Frequenzbereich zeigt sich nur bei ca. 7 kHz. Dort ist eine Frequenzdifferenz

zwischen beiden Spitzenpegeln von rund 200Hz festzustellen. Gesetzt den Fall, dass leichte Abweichungen zwischen den Übertragungsfunktionen beider Schallwandler bestehen und diese somit nicht den selben Wirkungsgrad in der Schallabstrahlung besitzen, kann zur Berechnung der Übertragungsfunktionen, bedingt durch das Bestehen nur sehr kleiner Unterschiede, dennoch Formel 4.4 herangezogen werden.

Die anderen Sony-Kopfhörer MDR EX35, sowie die neueren Sony MDR E828-Hörer zeigten ebenfalls sehr geringe Unterschiede in den Übertragungsfunktionen der rechten und linken Hörerkapsel.

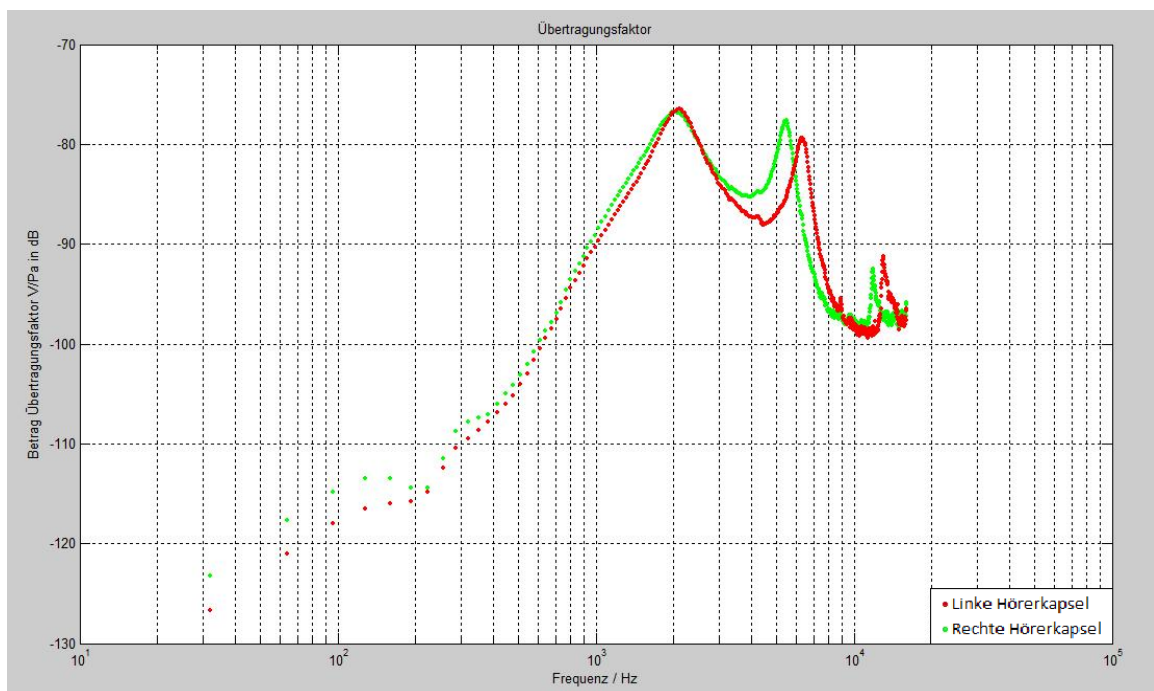


Abbildung 33: Vergleich der Übertragungsfunktion Koss "The Plug" Hörerkapsel links und rechts

Anders verhält es sich jedoch beim Modell "The Plug" von Koss. Hier zeigten sich recht deutliche Unterschiede im Wirkungsgrad beider Hörerkapseln (Abb. 33). Bis etwa 3kHz sind die Verläufe der rechten und linken Übertragungsfunktion noch sehr ähnlich. Oberhalb dieser Frequenz sind jedoch deutliche Verschiebungen beider Funktionen zueinander zu erkennen. So überträgt der linke Kopfhörer ein Signal bei 5kHz um etwa 5dB schlechter als

der rechte Kopfhörer. Die lokalen Maxima beider Funktionen um 6kHz sind ebenfalls im Frequenzbereich zueinander verschoben. Das lokale Maximum des rechten Hörers liegt bei rund 5,5kHz um etwa -78dB, das des linken Hörers bei etwa 6,3kHz und -80dB. Es wurden mehrere Messungen der jeweiligen Kapseln durchgeführt. Alle angestellten Messungen wurden dabei, bedingt durch das Halten des Mikrofons mit der Hand an die Druckkammer, mit jeweils leicht anderen Abdichtungen des Schallwandlers zur Druckkammer durchgeführt. Die Ergebnisse dieser verschiedenen Messungen zeigen jedoch alle dieselbe fehlende Übereinstimmung der Kurven im höheren Frequenzbereich. Würde dieser Effekt durch mangelnde Abdichtung verursacht, wäre er in jeder Messung unterschiedlich stark ausgeprägt. Ursächlich für diese unterschiedlichen Übertragungsfunktionen sind deshalb höchstwahrscheinlich Abweichungen im Aufbau der Kopfhörerkapseln. Die Annahme gleicher Übertragungsfunktionen gilt für diesen Kopfhörer also nur bedingt. Die errechneten Übertragungsfunktionen für diesen Kopfhörer sind somit nur für den linken Kopfhörer richtig. Der tatsächliche Wirkungsgrad der Schallabstrahlung des rechten Kopfhörers wird in den Übertragungsfunktionen leicht verfälscht dargestellt.

7. Fehlersimulation

Ein Teil der Diplomaufgabe ist es, mögliche Fehlerquellen, die die Kopfhörerkalibrierung beeinflussen können, aufzuzeigen und Methoden zu untersuchen, diese möglichen Fehlerursachen zu unterbinden oder deren Auswirkung auf die Messergebnisse zu mindern. Alle Fehlerquellen, die in Vorversuchen erkannt wurden oder während der Messungen zu verfälschten Übertragungsfunktionen führten, werden in dem folgenden Kapitel aufgezeigt und deren Auswirkung auf die Messergebnisse untersucht.

7.1. Betrachtung möglicher Fehlerquellen

Als Störquellen mit den größten Auswirkungen auf die Pegel der Übertragungsfunktion zeigten sich Manipulationen an den einzelnen Kopfhörerkapseln bzw. der Anbindung der Kopfhörer zur Druckkammer. Weitere deutliche Verfälschungen der Messergebnisse verursachten systeminterne Effekte, wie starkes Rauschen oder Schwingungen in elektrischen Komponenten der Messschaltung. Auch konnte die Güte der Messungen mittels von außen eingetragener Störeffekte negativ beeinflusst werden. Besonders akustische Störsignale können zu deutlich anderen Messergebnissen führen. Elektromagnetische Störsignale haben besonders auf die Messschaltung einen negativen Einfluss. Elektrische Störeffekte konnten dabei besonders durch eine schlechte oder nicht vorhandene Abschirmung durch einen Faradayschen Käfig verstärkt werden. Fehler in der Signalaufzeichnung und Signalverarbeitung sind weitere Quellen für abweichende Übertragungsfunktionen.

7.2. Ergebnisse der Fehlersimulation

Grundsätzlich war bei Versuchen in der Fehlersimulation festzustellen, dass alle Kopfhörer gleich oder zumindest ähnlich auf die Fehlerquellen reagierten. Deswegen werden hier die Fehlerbilder nur beispielhaft für einzelne

Kopfhörermodelle untersucht. Dabei sind nur die Fehlerbilder mit der stärksten Fehlerausprägung dargestellt.

7.2.1. Fehlersimulation durch schlechte Abdichtung der Druckkammer und Verschluss der Ausgleichskanäle

In den Abbildungen 34 und 35 sind die Übertragungsfunktionen der Messungen mit schlecht abgedichteten Druckkammern dargestellt. In ersten Fall war nur der Sendekopfhörer zur Druckkammer so verkippt, dass man eine deutliche Undichtigkeit zwischen Hörerkapsel und Druckkammer sehen und hören konnte. Im zweiten Fall (Abb. 35) waren beide Schallwandler des Kopfhörers "The Plug" von Koss schlecht an die Druckkammer angebunden.

Sehr deutlich sind die Unterschiede zwischen der möglichst fehlerfrei aufgenommen Übertragungsfunktion blau und der durch die Fehlersimulation beeinflussten roten Übertragungsfunktion zu sehen. Es lassen sich keine eindeutigen Ähnlichkeiten zwischen beiden Funktionen erkennen.

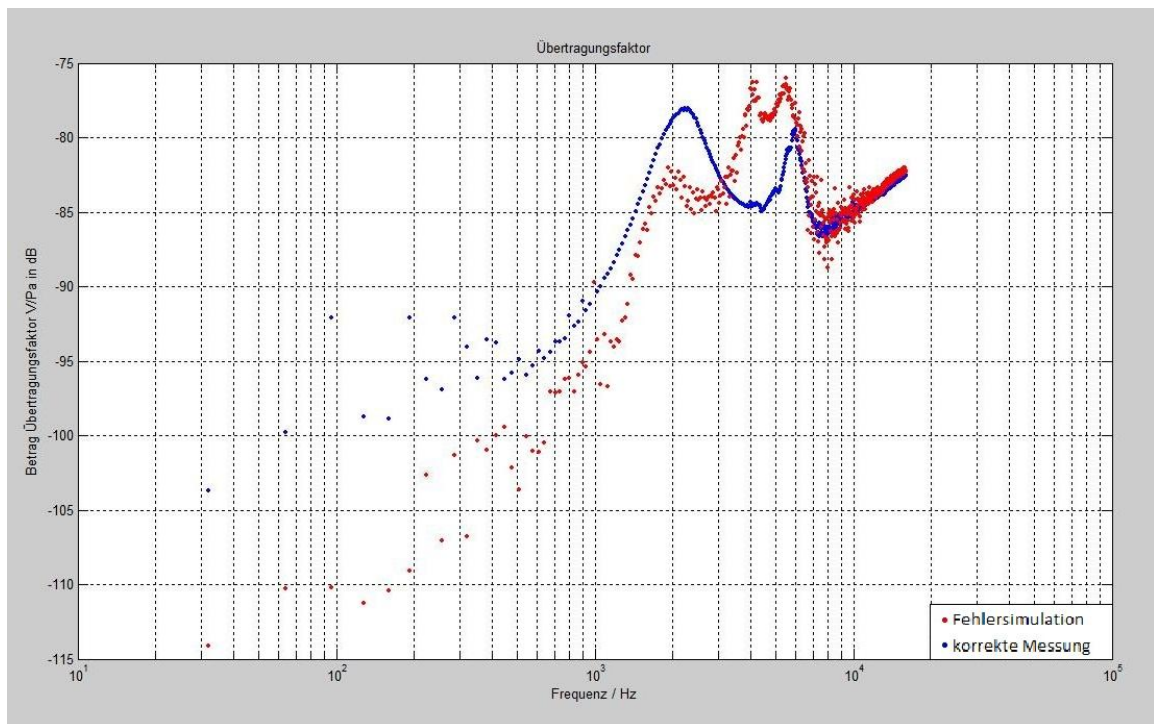


Abbildung 34: Übertragungsfunktion einer sendekanalseitig schlecht abgedichteten Druckkammer für den Kopfhörer Koss "The Plug"

Auch zeigt sich die rote Kurve sehr diffus bzw. verwischt und besitzt im Vergleich zur blauen Kurve drei lokale Maxima des Pegels. Im höheren Frequenzbereich von ca. 9kHz bis 16kHz sind jedoch mehr Ähnlichkeiten beider Funktionen zueinander erkennbar. Allerdings sind dort wahrscheinlich Resonanzeffekte während beider Messvorgänge für diese Analogien verantwortlich. So sind beide Übertragungsfunktionen in diesem Frequenzbereich für eine Aussage über den Verlauf der tatsächlichen Funktion ungeeignet.

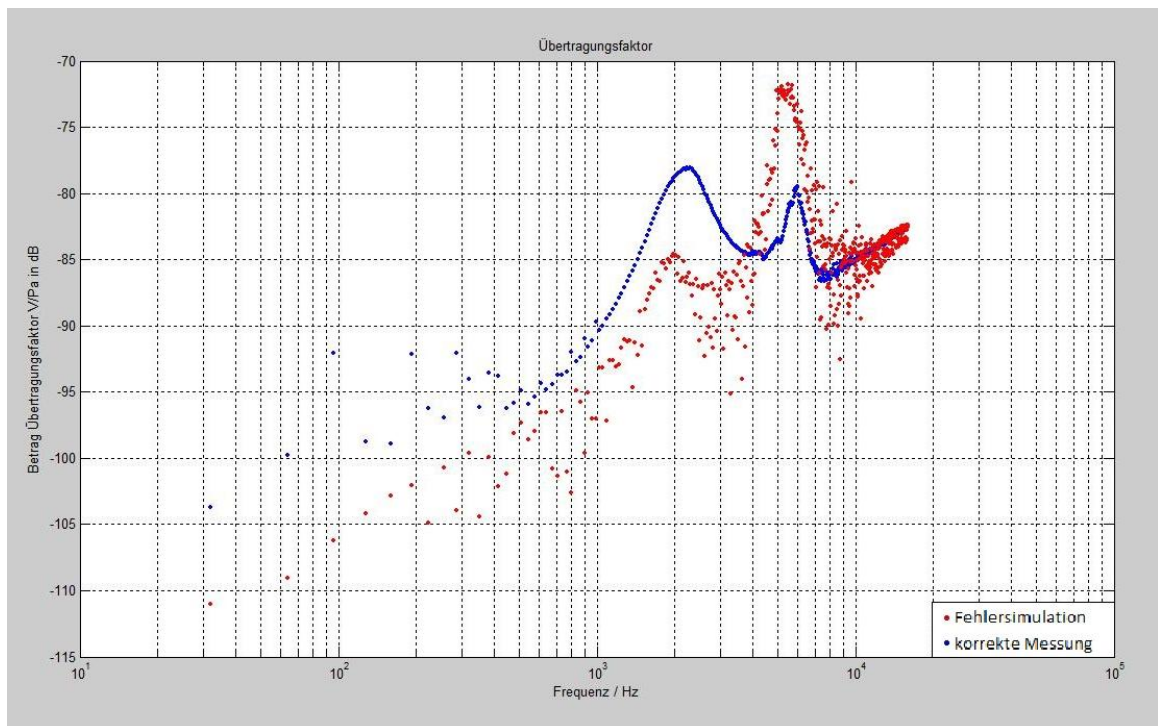


Abbildung 35: Übertragungsfunktion einer beidseitig schlecht abgedichteten Druckkammer für den Kopfhörer Koss "The Plug"

Abbildung 35 zeigt den Verlauf der Übertragungsfunktion für den Fall, dass beide Kopfhörer die Druckkammer ungenügend abdichten (rot). Diese Funktion ist stellenweise so diffus, dass eine klare Aussage über den Verlauf der Übertragungsfunktion nicht möglich ist.

In Abbildung 36 sieht man die Übertragungsfunktion der Kopfhörers Sony MDR E828 für den Fall einer empfangsseitig mangelhaft abgedichteten Druckkammer. Wie schon in den vorangegangenen Untersuchungen ist auch

hier der diffuse Verlauf der fehlerbehafteten Übertragungsfunktion deutlich. Im Gegensatz zu den Diagrammen des Koss-Kopfhörers liegen die Pegel der roten Funktion sehr breitbandig unter den Pegeln der korrekt durchgeführten Messung. Nur in einem relativ kleinen Frequenzbereich von 3kHz bis 6kHz liegen die Pegel der roten Funktion leicht über denen der blauen Funktion.

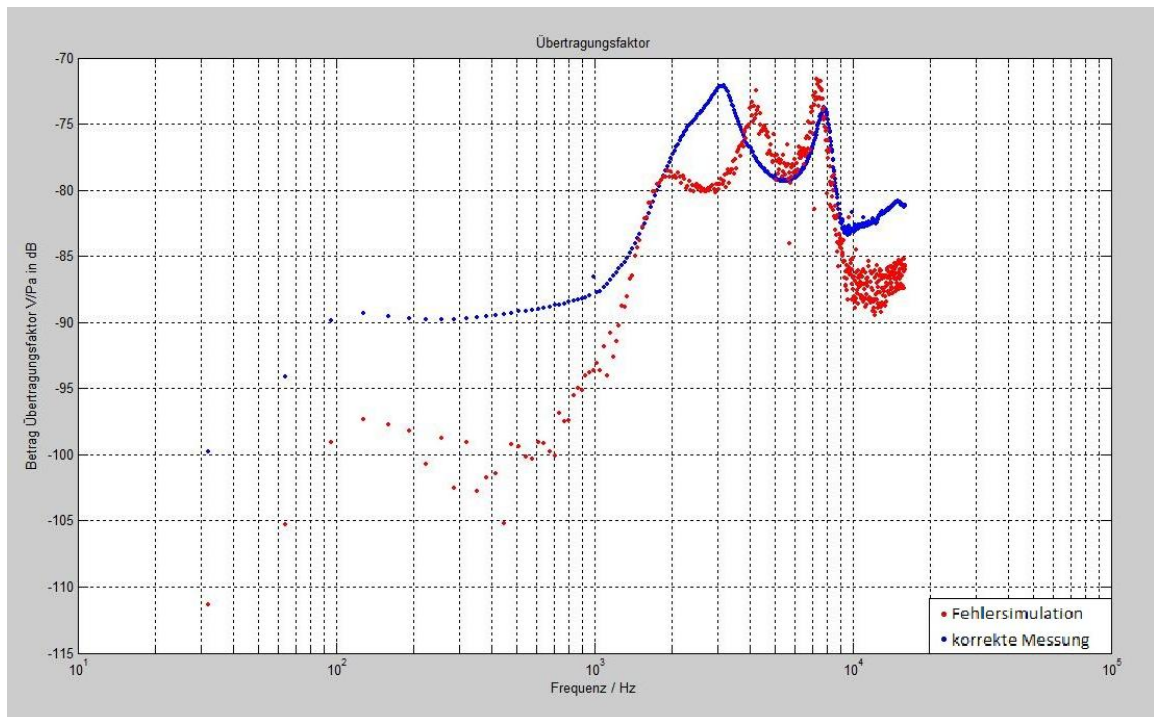


Abbildung 36: Übertragungsfunktion einer empfangsseitig schlecht abgedichteten Druckkammer für den Kopfhörer Sony MDR E828

Somit bleibt zu sagen, dass alle Fehler, die durch Undichtigkeiten der Druckkammer zu den Kopfhörerkapseln verursacht werden, zu einer fehlerhaften Darstellung der Übertragungsfunktion führen. Jedoch sind diese Fehler durch konstruktive Maßnahmen an der Druckkammer vermeidbar. So könnte dafür gesorgt werden, dass die Kopfhörerkapseln an der Druckkammer nur so eingespannt werden können, dass sie diese dicht abschließen. Fehlerhafte Messergebnisse nachträglich durch mathematische Eingriffe zu korrigieren, ist nicht oder nur sehr schwer möglich, da sich die physikalischen Eigenschaften einer undichten Druckkammer nur sehr schwer einordnen und mit großem Aufwand mathematisch nachbilden lassen.

Eine weitere Fehlerquelle, die sich durch eine Manipulation bei der Anbindung der Hörerkapseln zur Kammer nachbilden lässt, ist ein Verschluss der Ausgleichskanäle der Kopfhörer. Da sich die Kopfhörer von Koss bauartbedingt besonders anfällig für diese Art von Fehlern zeigten, soll im Folgenden nur dieses Kopfhörermodell ausgewertet werden.

Für diese Messungen wurden die auf der Rückseite befindlichen Ausgleichskanäle beider Kopfhörerkapseln (Abb.18 in Kapitel 5.1) gezielt mit den Gummibändern, die zum Fixieren der Kapseln an der Druckkammer gedacht sind, abgedeckt. Es wurde hier besonders darauf geachtet, dass keine Undichtigkeiten verursacht wurden, um eine Überlagerung von zwei verschiedenen Fehlerbildern zu vermeiden.

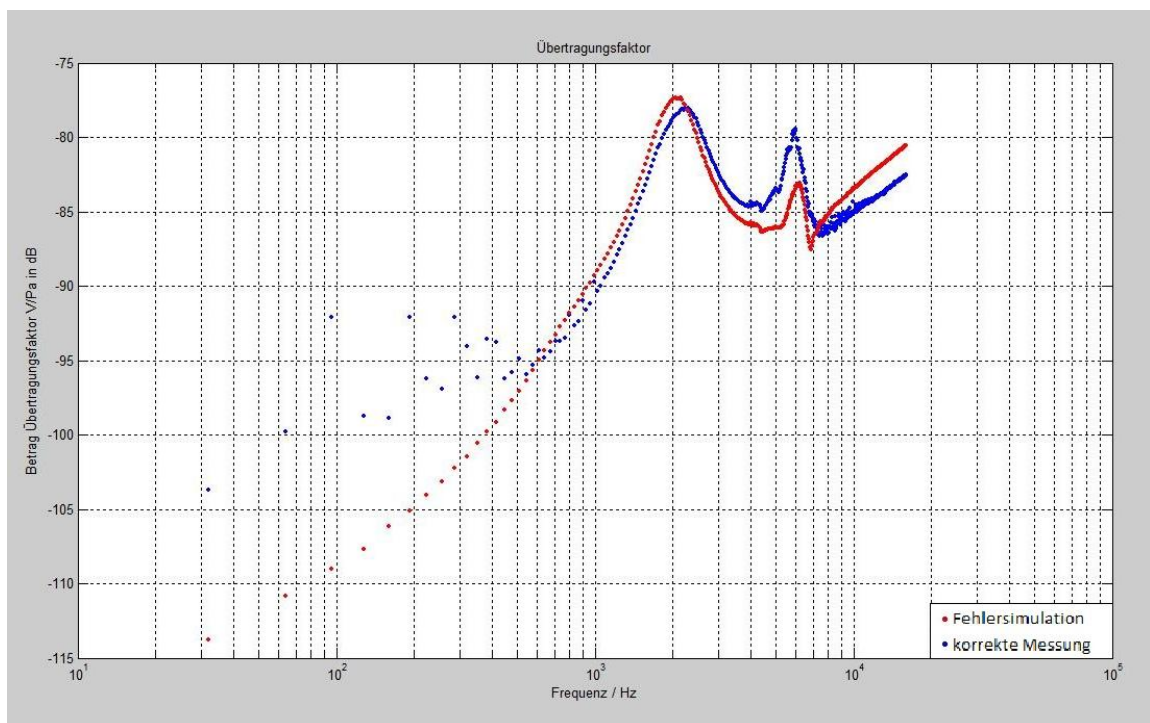


Abbildung 37: Übertragungsfunktion bei Verschluss der Ausgleichskanäle der Kopfhörerkapseln des Kopfhörer Koss "The Plug"

Als Erstes fällt, im Vergleich zu den Diagrammen der Übertragungsfunktion einer undichten Druckkammer, der sehr glatte Verlauf der roten Übertragungsfunktion auf. Diese zeigt sogar noch einen etwas glatteren Verlauf als die Funktion der korrekten Messung (blau). Selbst bei sehr tiefen Pegeln im

tiefen Frequenzbereich sind keine sprunghaften Pegelveränderungen erkennbar. Übermäßig große Abweichungen beider Funktionen im Frequenzbereich werden jedoch nicht deutlich. Nur im Bereich von etwa 4kHz bis 6,5kHz sind Pegelunterschiede von 1dB bis etwa 3dB erkennbar.

Eine nachträgliche Korrektur dieses Fehlerbildes durch mathematische Maßnahmen ist auch hier nur schwierig machbar. Es sollte daher eine Kontrolle der Ausgleichkanäle vor der Messung erfolgen, um dieses Fehlerbild grundsätzlich zu vermeiden.

7.2.2. Fehlersimulation zusätzlicher erzeugter Rauschsignale im Messsystem und Übersteuerung der Aufnahmekanäle

In diesem Kapitel werden Fehler, die durch einen Eingriff von außen in das Messsystem während einer Messung oder durch eine fehlerhafte Signalaufzeichnung erzeugt werden, simuliert.

Zusätzliche Rauschsignale können, wie schon im Kapitel 4.5 kurz beschrieben, durch das Berühren der elektrischen Abschirmung oder von Komponenten der Messschaltung erzeugt werden. Höchstwahrscheinlich ist eine Änderung der elektrischen Masse des Messsystems für dieses Verhalten verantwortlich. Eine Aussage, durch welche Komponente der Schaltung dieser Effekt genau verursacht wird, konnte bisher nicht genau getroffen werden. Für die hier angestellten Messungen wurde durch das Berühren des die Messschaltung umgebenden Faradayschen Käfigs mit der Hand ein stärkeres Rauschen auf den Empfangskanälen erzeugt. Dabei war es egal, welches Kopfhörermodell an die Schaltung angesteckt war - der Effekt zeigt sich jeweils in ähnlichen Ausprägungen.

Abbildung 38 zeigt, bis auf den etwas gestreuten Pegelverlauf der fehlerhaften Übertragungsfunktion, ein sehr ähnliches Verhalten gegenüber der blauen Funktion. In allen Frequenzbereichen sind nur Pegeldifferenzen von 1db bis maximal 3dB erkennbar. Nur bei sehr tiefen Frequenzen von 32Hz und 64Hz sind Differenzen von etwa 8dB bzw. 5dB ersichtlich. Da das Messsystem im tiefen Frequenzbereich grundsätzlich recht hohe Unterschiede von Messung

zu Messung in den Pegeln aufweist, kann nicht gesagt werden, ob diese Differenzen tatsächlich durch ein stärkeres Rauschen im System verursacht werden.

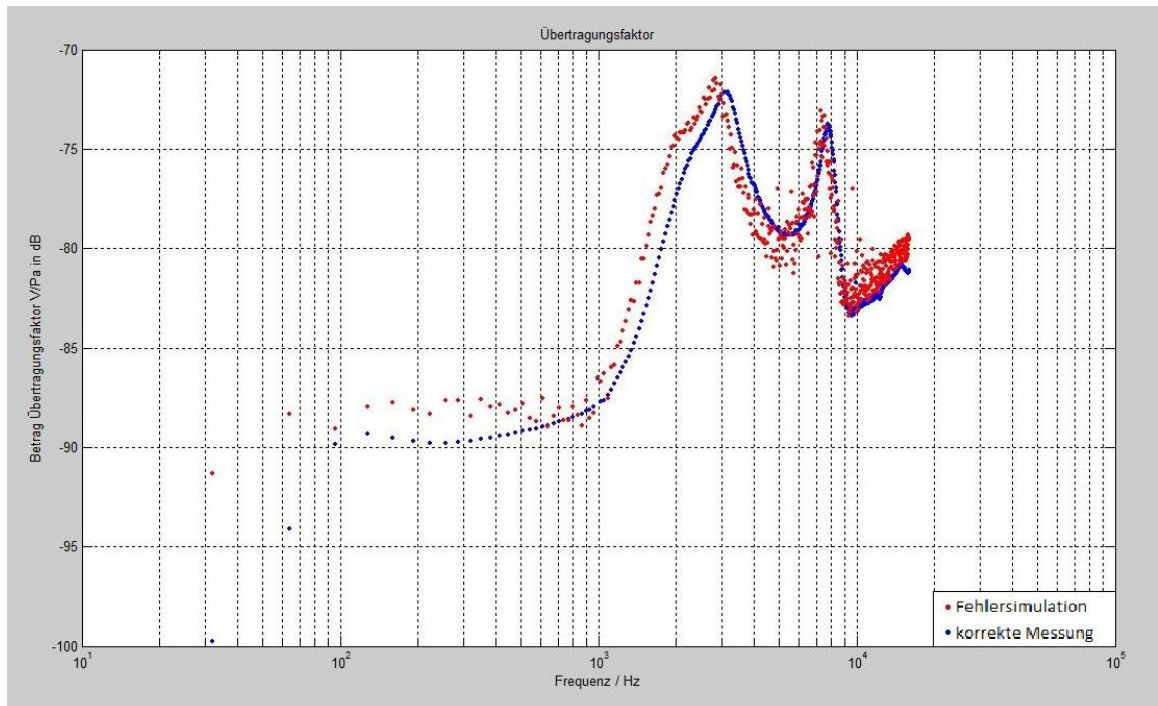


Abbildung 38: Übertragungsfunktion mit zusätzlichen erzeugten Rauschsignalen im Messsystem Kopfhörer Sony MDR E828

Dieses Fehlerbild kann jedoch durch ein anderes Kalibriersignal vermieden werden. So wäre ein Herausmitteln dieser stärkeren Rauschanteile durch eine größere Anzahl an möglichen Mittelungen in der Signalverarbeitung möglich. Dazu müsste man ein Kalibriersignal erzeugen, welches mehr als 1000 Wiederholungen des Zeitsignals enthält. Dieses hätte aber den Nachteil, dass mit steigender Anzahl der Wiederholungen auch die Dauer des Zeitsignals zunimmt. Ein Kalibriersignal mit 3000 Wiederholungen wäre schon 90 Sekunden lang. Bei noch mehr Wiederholungen würde das Signal entsprechend länger werden. Der Zeitaufwand, der zur Auswertung und Berechnung der Übertragungsfunktionen im Programm MATLAB nötig wäre, würde ebenfalls deutlich größer werden. Deshalb wäre auch hier wieder die

grundsätzliche Vermeidung dieses Fehlerbildes der einfachste aller möglichen Lösungswege.

Abbildung 39 zeigt das Verhalten der Übertragungsfunktion, wenn beide Messkanäle der Instrumentenverstärker die Signale übersteuert aufzeichnen. Die Pegelwerte der roten Funktion sind stark gestreut und liegen relativ gleich verteilt oberhalb und unterhalb der Übertragungsfunktion der korrekten Messung. Dennoch sind die Ähnlichkeiten beider Funktionen zueinander deutlich erkennbar.

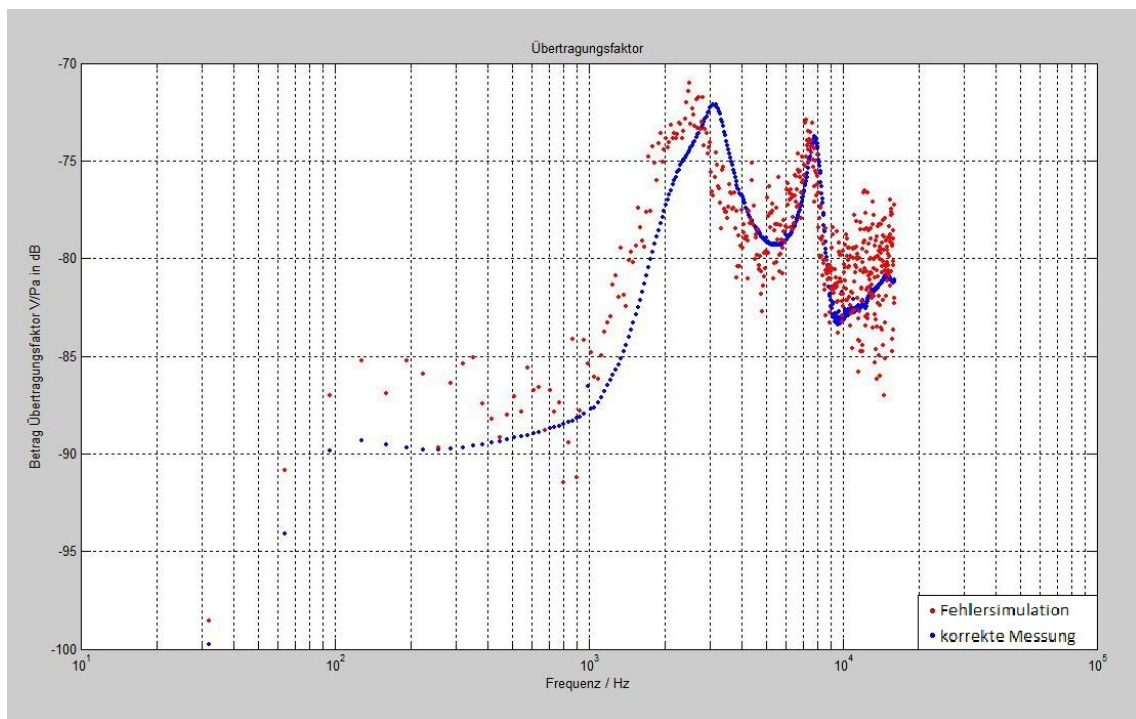


Abbildung 39: Übertragungsfunktion bei übersteuerten Aufnahmen der Messkanäle
Kopfhörer Sony MDR E828

Übersteuerte Pegelanteile bei der Signalaufnahme werden durch das Programm AUDACITY® nicht mit aufgezeichnet. Der nicht aufgezeichnete Pegelanteil bedeutet einen Informationsverlust im zu verarbeitenden Zeitsignal. Eine nachträgliche Korrektur der Übertragungsfunktion ist, bedingt durch diesen Informationsverlust, nicht möglich. Daher gilt auch für diesen Fehler, dass eine Vermeidung des Fehlerbildes für die korrekte Berechnung der Übertragungsfunktion erforderlich ist.

7.2.3. Fehlersimulation durch Eintragen von elektrischen und akustischen Störsignalen von außen in das Messsystem

In diesen Messreihen wurde das Messsystem gezielt durch Störsignale aus nächster Umgebung gestört. Dabei wurden durch elektromagnetische Wellen die Messschaltung und die Kopfhörer beeinflusst. Die Einflüsse dieser Störquelle auf die Übertragungsfunktion zeigt Abbildung 40. Den Einfluss akustischer Störsignale auf den Übertragungsfaktor zeigt Abbildung 41.

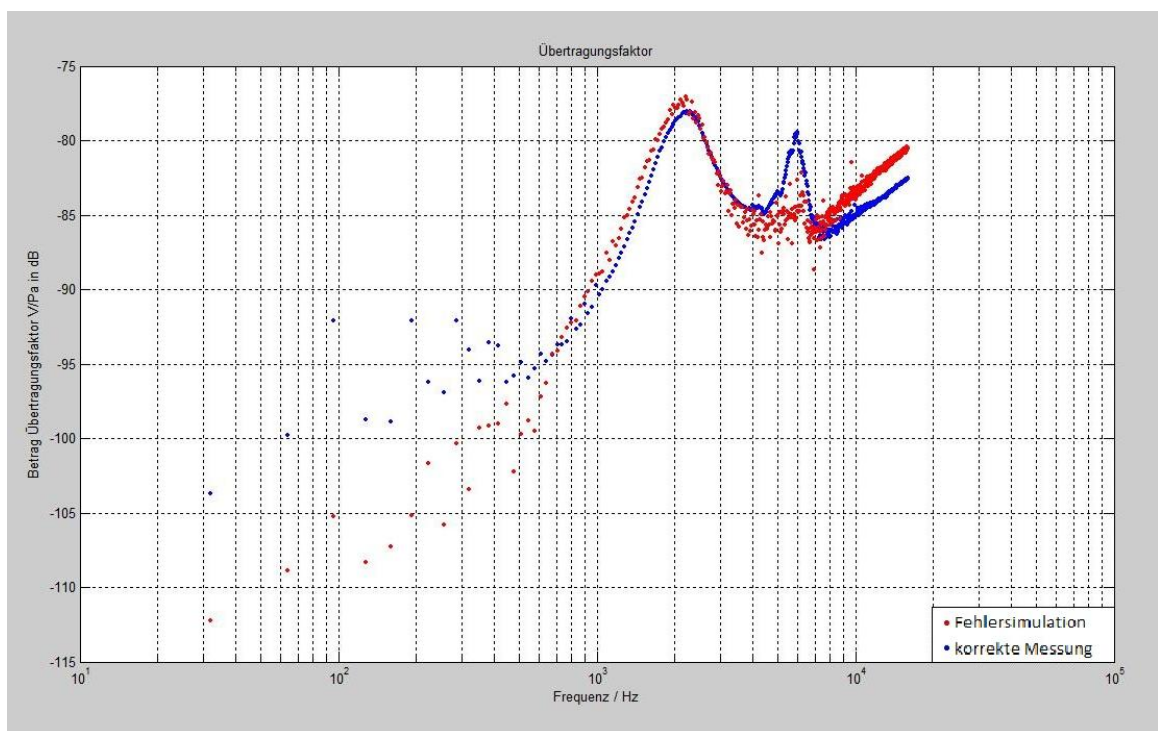


Abbildung 40: Übertragungsfunktion beeinflusst durch elektromagnetische Störsignale von außen, Kopfhörer Koss "The Plug"

Als elektromagnetische Störquelle dienten eine eingeschaltete Bildröhre sowie ein für die Dauer der Messungen angerufenes Mobilfunktelefon. Beide Störquellen wurden nur wenige Zentimeter von der Schaltung und den Kopfhörern betrieben. Sowohl die Druckkammer als auch die Messplatine waren für diese Messungen nicht durch einen Faradayschen Käfig gegen elektromagnetische Strahlungen geschützt. Es zeigt sich aber, dass selbst durch die sehr starken Störungen, die durch ein Mobilfunktelefon und eine

Bildröhre entstehen können, keine großen Einflüsse auf die errechneten Übertragungsfunktionen entstanden. Nur im Bereich von 4kHz bis 7kHz ist ein diffuser Verlauf der Übertragungsfunktion der Fehlersimulation erkennbar. Dieses Rauschen könnte jedoch über eine größere Anzahl von möglichen Mittelungen der Leerlaufempfangsspannung und des Sendestroms unterdrückt werden.

Als akustisches Störsignal diente bei den Messungen ein in direkter Nähe zur Druckkammer laut abgespieltes Musikstück.

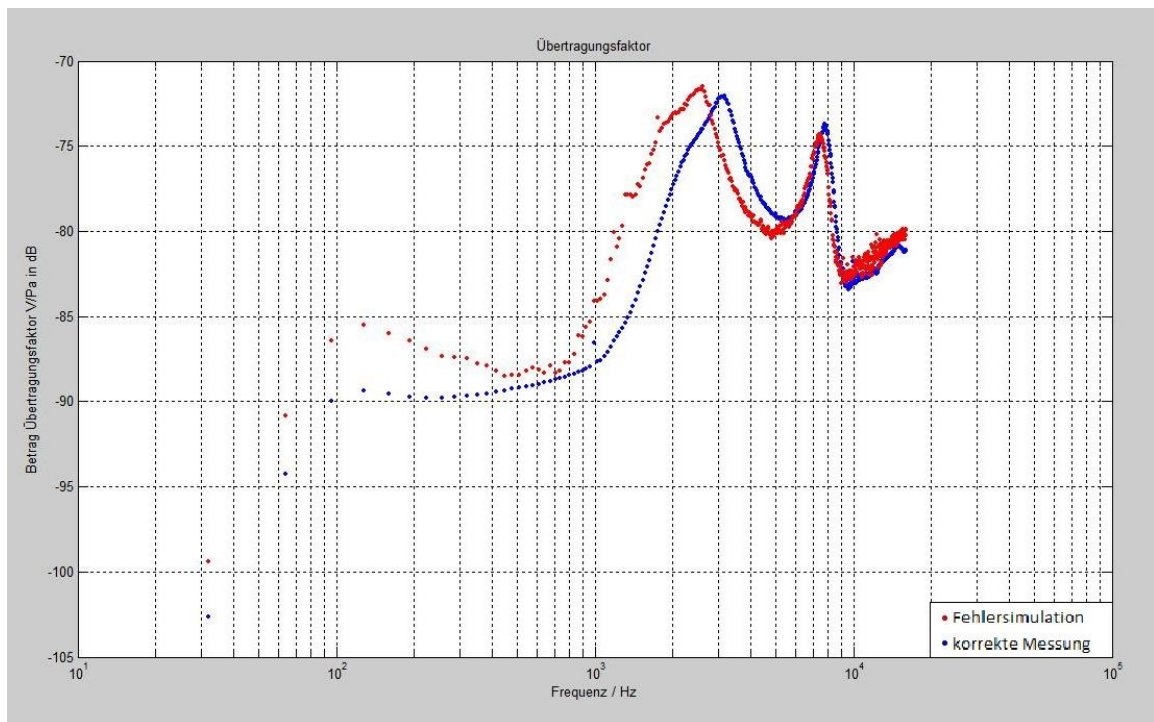


Abbildung 41: Übertragungsfunktion beeinflusst durch akustische Störsignale von außen, Kopfhörer Sony MDR E828

Der Verlauf der roten Übertragungsfunktion scheint im Frequenzbereich von 500Hz bis 6kHz um etwa 400Hz gegenüber der blauen Funktion, hin zu tiefen Frequenzen, verschoben zu sein.

Oberhalb von 6kHz sind die Verläufe beider Funktionen fast identisch. Mittels nachträglicher Korrekturen dieses Fehlerbildes sind keine Minimierungen der

Fehler zu erwarten. Die Aufnahmesituation sollte möglichst nicht durch akustische Störsignale beeinflusst werden.

7.2.4. Fehlersimulation durch Verwendung einer falsch dimensionierten Druckkammer

Die größten Unterschiede zwischen korrekt durchgeführter Messung und fehlerhafter Messung erzeugt eine falsch dimensionierte Druckkammer. Diese Fehlerquelle kann nur mit dem Kopfhörermodell Sony MDR EX35 nachgestellt werden. Alle anderen untersuchten Kopfhörer sind nicht geeignet für diese Fehlersimulation. Durch die geringe Größe der Kopfhörerkapsel des Sony EX35 Hörers am Schallauslass kann die Wahl der falschen Druckkammer dazu führen, dass beide Kopfhörerkapseln sich in der Mitte der Kammer berühren und es somit auch zu keiner Abdichtung der eigentlichen Druckkammer kommt.

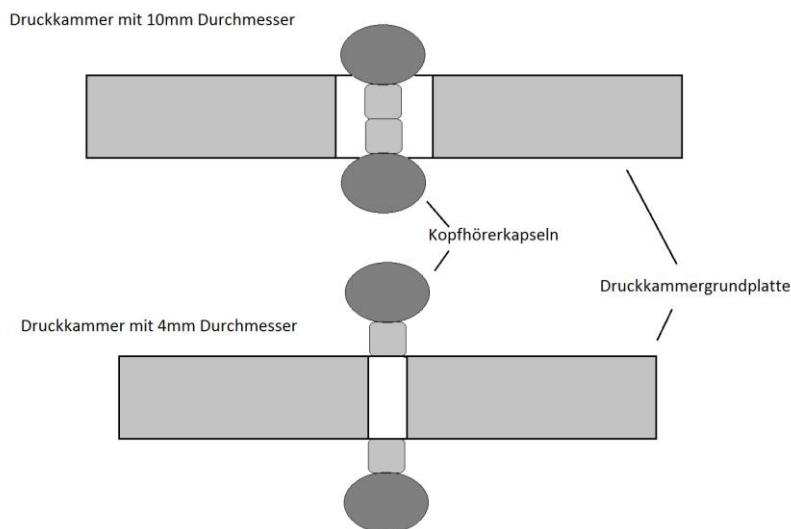


Abbildung 42: Darstellung falsch und richtig dimensionierte Druckkammer für den Kopfhörer Sony MDR EX35

So zeigt Abbildung 42 im oberen Teil eine zu große genutzte Druckkammer (Durchmesser 10mm). Beide Hörerkapseln bilden dort quasi eine eigene, sehr viel kleinere Druckkammer aus. Welches Volumen diese dann besitzt, kann nur grob abgeschätzt werden. Eine mit zu hohen Pegeln errechnete Übertragungsfunktion wäre die Folge. Im unteren Teil von Abbildung 42 ist eine

Druckkammer mit dem Durchmesser von 4mm dargestellt. Diese eignet sich deutlich besser für eine korrekte Messung der Übertragungsfunktion.

Wie gering die Ähnlichkeiten zwischen den beiden Funktionen sind, die in diesen unterschiedlich großen Druckkammern gemessen wurden, wird aus Abbildung 43 ersichtlich. Eine anschließende Korrektur dieses Fehlerbildes kann nicht durchgeführt werden.

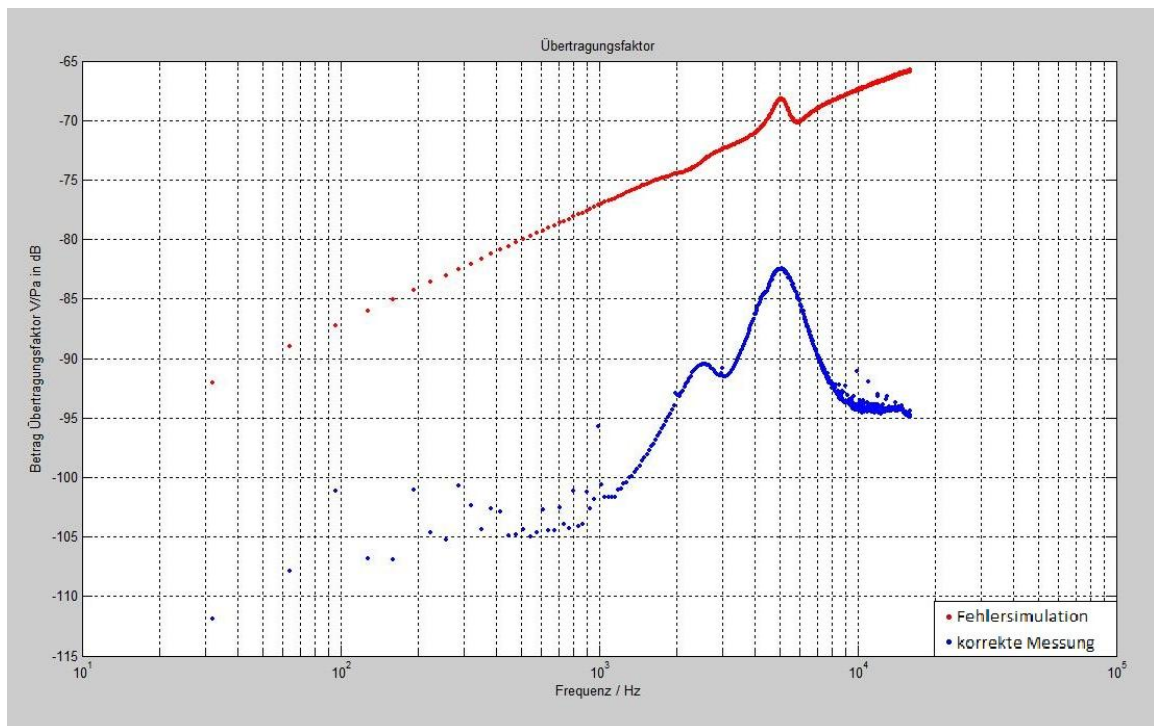


Abbildung 43: Übertragungsfunktion in einer ungünstig gewählten Druckkammer
(Durchmesser 10mm) Kopfhörer Sony MDR EX35

7.3. Auswertung

Jede simulierte Undichtheit der Druckkammer führte zu starken Fehlern der errechneten Übertragungsfunktion. Diese Fehler konnten nicht nachträglich durch mathematische Methoden korrigiert werden. Eine bestmöglich abgedichtete Druckkammer sollte daher vor jeder Messung sichergestellt werden. Alle Fehlerquellen, die ein Rauschen im Messsystem erzeugten, wie systeminternes Rauschen oder der Eintrag von elektromagnetischen Störsignalen, können über eine größere Anzahl von Mittelungen in der

Auswertung unterdrückt werden. Akustische Störsignale hingegen erzeugen große Abweichungen der Übertragungsfunktion. Deshalb sollte eine ruhige Umgebung für die Messungen gewählt werden. Auch sollte auf die Wahl der richtigen Druckkammergröße und der korrekten Systemeinstellung, wie Signalaussteuerung geachtet werden

Es sollte daher vor jeder Messung gewissenhaft überprüft werden, ob alle Einstellungen und Parameter korrekt sind. Um sicherzustellen, dass alle Einstellungen richtig sind, bedarf es im Vorfeld der Messung nur weniger Handgriffe. Eine nachträgliche Korrektur der Messwerte ist nur mit großem Aufwand oder oft auch gar nicht möglich.

8. Interpretation und Schlussfolgerungen der Messungen

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse, die das in dieser Diplomarbeit entwickelte Messsystem liefert, reflektiert und überprüft werden, ob die getroffenen Annahmen eingehalten wurden.

Zum Ersten zeigen die vielen verschiedenen angestellten Messreihen, dass das Messsystem unter gleichen Umgebungs- und Messbedingungen sehr konstante Messergebnisse liefert. Im Vergleich zu den Übertragungsfunktionen, die das Messsystem mit dem ½ Zoll-Mikrofon liefert, sind beim vorgestellten System jedoch bei der Untersuchung ein und desselben Kopfhörermodells gewisse Unterschiede in den Messergebnissen erkennbar. Eine grundsätzliche Gleichheit aller Messergebnisse lässt sich dennoch erkennen. In vielen Bereichen der Frequenz zeigten die beiden Messsysteme sogar nahezu identische Ergebnisse. Es kann also der Schluss gezogen werden, dass das entwickelte Messsystem in gewissen Grenzen sehr realitätsnahe Übertragungsfunktionen ermittelt. Im Frequenzbereich von etwa 1kHz bis zu 7kHz sind die Messungen aller verglichenen Messsysteme sehr ähnlich. Oberhalb und unterhalb dieses Frequenzbereiches gibt es erhebliche Unterschiede in den Messergebnissen. Da jedoch gehörschädigende Schalldrücke beim Abspielen von Musikstücken mit einem Multimediagerät unter Verwendung verschiedener Kopfhörermodelle nur im Frequenzbereich von etwa 1kHz bis 6kHz zu erwarten sind, ermöglicht das entwickelte Messsystem eine sehr genaue Messung der Übertragungsfunktion und einer anschließenden Kalibrierung der Kombination aus Kopfhörer und Abspielgerät für diesen Frequenzbereich von Interesse.

Die Zielsetzung, eine Gehörschädigung mittels einer Kopfhörerkalibrierung zu vermeiden, könnte also mit dem vorgestellten Messsystem realisiert werden.

Auch zeigte sich im Rahmen dieser Diplomarbeit, dass es sehr große Unterschiede im Wirkungsgrad der Schallabstrahlung der verschiedenen Kopfhörermodelle gibt. So könnten die Kopfhörer MDR E828 von Sony bei der Nutzung mit einem Multimediagerät bei einer Frequenz von 3kHz einen um

etwa 19dB höheren Schalldruckpegel am Gehöreingang erzeugen, als die Kopfhörer MDR EX35 desselben Herstellers. Dieser Sachverhalt unterstützt die Annahme, dass bei der Verwendung eines Musikabspielgerätes mit einem anderen Kopfhörer als dem vom Hersteller vorgesehenen, schädliche Schalldrücke im Gehörgang erzeugt werden können.

Um ein möglichst einfaches und kostengünstiges Messsystem aufbauen zu können, musste die Annahme der Gleichheit der Übertragungsfunktion beider Hörerkapseln eines Kopfhörerpaares angenommen werden. Diese Annahme konnte für drei der vier untersuchten Kopfhörer bestätigt werden. Nur für das Modell "The Plug" von Koss ergaben sich leicht unterschiedliche Übertragungsfunktionen der beiden Hörerkapseln. Würde man diese Kopfhörer nach der gemessenen falschen Übertragungsfunktion kalibrieren, wären leicht erhöhte Schalldruckpegel gegenüber einer Kalibrierung mit den tatsächlichen Übertragungsfunktionen die Folge. Jedoch wären nur etwa 1dB bis 3dB höhere Schalldruckpegel am Gehöreingang zu erwarten. Der Fehler, den man somit begehen würde, wäre nur relativ klein.

9. Ausblick

In Rahmen dieser Diplomarbeit sind einige negative Eigenheiten der Messschaltung aufgetreten, die durch eine Weiterentwicklung auf elektrotechnischer Seite des Messsystems vermieden oder gemindert werden könnten. Es sollte daher untersucht werden, inwieweit Verbesserungen in dieser Richtung möglich sind. Durch eine größere Anzahl von gemessenen Kopfhörermodellen könnte eine größere statistische Sicherheit der Messergebnisse erreicht werden. Ebenfalls könnte so der Einfluss von Alterung und Gebrauchsdauer auf die Übertragungsfunktion der Kopfhörerkapseln untersucht werden. Von Interesse wäre auch die Fragestellung, inwiefern sich das entwickelte Messsystem für eine Kalibrierung der Kopfhörer direkt in Abspielgeräten integrieren ließe. So enthalten viele Multimediageräte bereits einige elektrische Komponenten, die für den Aufbau solch eines Messsystems notwendig wären.

Eine Weiterentwicklung der verwendeten Druckkammer wäre auch von Interesse. Mit kleineren und auf die Eigenschaften der gemessenen Kopfhörerkapseln besser angepassten Druckkammern könnte die Übertragungsfunktion bis in höhere Frequenzbereiche resonanzfrei aufgezeichnet werden. Eventuell auftretende Effekte in diesem Frequenzbereich könnten so besser berücksichtigt werden.

III. Literaturverzeichnis

- /1/ *Künzel, K.:* Studienmaterial für die Vorlesung Technische Akustik I, Studienrichtung Umwelttechnik/ Akustik, Heft 1 & 2, Hochschule Mittweida, 2006

- /2/ *Schulz, D.:* Studienmaterial für die Vorlesung: Messwert und Signalverarbeitung, Studienrichtung Umwelttechnik/ Akustik , Hochschule Mittweida, 2008

- /3/ *Müller, G.; Mörser, M.:* Taschenbuch der Technischen Akustik, Kapitel 2, dritte erweiterte und überarbeitete Auflage, Verlag: Springer Berlin Heidelberg New York, 2004

- /4/ *Press, W.H.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T.; Flannery, B.P.:* Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing, dritte Auflage, Kapitel 12, Verlag: Cambridge University Press, 2007

- /5/ *Linear Technology Corporation:* Single Resistor Gain Programmable, Precision Instrumentation Amplifier LT1167 Linear Technology Corporation, 1998

- /6/ *Borwick, J.:* Loudspeaker and Headphone Handbook, Seiten 585–692., 3 Auflage , Verlag: Focal Press, Oxford, 2001.

- /7/ *Sachs, J.; Thomä, R.:* Vergleichende Untersuchungen zum Einsatz ausgewählter Testsignale in der akustischen Messtechnik, Friedrich, J, Peyerl, P. MEODAT GmbH Ilmenau, Sonderdruck, 1996.
- /8/ *Weinzierl, S.:* Handbuch der Audiotechnik, Kapitel 21.2. , Verlag: Springer Berlin Heidelberg New York, 2008.
- /9/ *Randall, R.B.; Tech, B.:* Frequency Analysis, 3. Auflage, Verlag: Brüel & Kjær, 1987.
- /10/ *Mäusl, R.; Schlagheck E.:* Messverfahren in der Nachrichten-Übertragungstechnik, 2. überarbeitete Auflage, Verlag: Hüthig, Heidelberg, 1991.
- /11/ *Ohm, J.R.; Lüke, H.D.:* Signalübertragung/ Grundlagen der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme, 10. Auflage, Verlag: Springer Berlin Heidelberg New York, 2006.
- /12/ *Unbehauen, R.:* Systemtheorie/ Grundlagen für Ingenieure, 6. Verbesserte Auflage ,Verlag: R. Oldenburg, 1993.
- /13/ Instrumentenverstärker, <URL><http://de.wikipedia.org/wiki/Instrumentenverst%C3%A4rker>, verfügbar am 01.07.2010
- /14/ Operationsverstärker-Grundsaltung,<URL>
<http://www.mikrocontroller.net/articles/Operationsverstärker-Grundsaltungen>, verfügbar am 04.07.2010

- /15/ Gleichtaktunterdrückung, <URL> <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Gleichtaktunterdrueckung-CMR-common-mode-rejection.html>, verfügbar am 09.07.2010
- /16/ <cinetix@t-online.de >: Sensoren in Brückenschaltung, Instrumentenverstärker <URL><http://www.as-workshop.de/sensprax/inabruek.htm>, verfügbar am 04.07.2010

Eidesstattliche Erklärung

Hierdurch erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tag eingereichte Diplomarbeit selbständig verfasst und ausschließlich die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Dresden, den

Unterschrift: